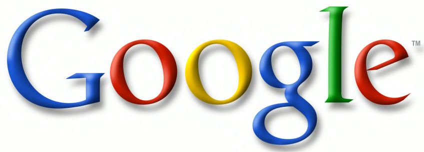






Die Wirkungsweise,
Berechnung und Konstruktion

Elektrischer Gleichstrom-Maschinen.

Praktisches Handbuch

für Elektrotechniker, Maschinenkonstrukteure und Studierende

von

J. Fischer-Hinnen,
früh. Chefkonstrukteur der Maschinenfabrik Oerlikon.

Vierte, vollständig umgearbeitete und stark vermehrte Auflage.

Mit 394 in den Text gedruckten Figuren und 3 lithogr. Tafeln.



Zürich,
Verlag von Albert Raustein
vormals Meyer & Zellers Verlag
1899.



Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Motto: Aus der Praxis für die Praxis.

Auszug aus dem Vorwort zur dritten Auflage.

Die grösste Schwierigkeit, welche sich dem angehenden Elektrotechniker entgegenstellt, besteht bekanntlich nicht in der Erlernung der für die Berechnung erforderlichen Lehrsätze und Formeln, sondern in der Art und Weise, das Erlernte praktisch zu verwenden, d. h. aus der Unmasse von Formeln gerade diejenigen herauszufinden, welche in einem gegebenen Falle schnell zum Ziele führen. Es muss ihm deshalb Gelegenheit gegeben werden, das Erlernte an Beispielen ausgeführter, mustergiltiger Maschinen zu erproben. Dies ist um so unerlässlicher, als eben heutzutage, infolge der engen Verknüpfung der Elektrizität mit den übrigen technischen Gebieten, vielfach von Technikern nach einem solchen Buche gegriffen wird, deren eigentlicher Beruf nicht die Elektrizität ist, und die sich eine richtige Vorstellung und ein Urteil erst an Hand von Beispielen zu bilden vermögen.

Einen Hauptwert legte ich auf möglichst deutliche, der Praxis entnommene Zeichnungen. Äussere Ansichten oder Photographien sind für einen solchen Zweck wenig geeignet und sollen höchstens als Vervollständigung der Schnittzeichnungen benutzt werden.

Wer zu beobachten versteht, wird herausfinden, dass in dem konstruktiven Teile, abgesehen von unwesentlichen Nüancen, sozusagen sämtliche modernen Konstruktionen aufgeführt sind, teils einzeln, teils in Verbindung mit anderen Maschinenteilen. Wenn ich mich dagegen im VIII. Kapitel „Beschreibung ausgeführter Maschinen“ speziell über schweizerische und wenige ausländische Fabrikate ausspreche, so bitte ich mir dies nicht als Einseitigkeit anrechnen zu wollen. Dem Prinzipe getreu, nur Schnittzeichnungen aufzunehmen, musste ich überaus manches von der Hand weisen, was augenscheinlich mehr auf Reklame berechnet war und war daher auf das Material weniger Etablissements angewiesen, welche keine Vorurteile gegen eine solche Veröffentlichung hatten. Allerdings betrachte ich dieses Kapitel nicht als geschlossen, ich gestatte mir vielmehr, auch an die ausländischen und speziell deutschen Fabrikanten die ergebene Bitte um Überlassung von Schnittzeichnungen zu richten, die in einer späteren Auflage zur Verwendung kommen sollen.

Bei einem Werke dieser Art lag die Versuchung nahe, möglichst viele empirische Formeln einzuführen. Solche Formeln schaden

dem Anfänger im allgemeinen mehr, als sie nützen. Ich habe deshalb nicht ermangelt, an den wenigen Stellen, wo mir solche zweckdienlich erschienen, jeweilig auch den Ursprung und die Ableitung anzugeben.

Durch Hinzufügung des Kap. VI (Bürstenverschiebung) glaube ich nunmehr nicht nur alle Elemente zu bieten, welche für die Berechnung von Gleichstrommaschinen benötigt werden, sondern, was nicht minder wichtig ist, zum ersten Male den Weg vorgezeichnet zu haben, wie eine Beurteilung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften solcher Maschinen möglich ist.

Le Raincy, S. et O. (près Paris), den 3. October 1896.

J. Fischer-Hinnen.

Vorwort zur vierten Auflage.

Die vierte Auflage dieses Buches hat ebenfalls gegenüber der dritten, sowie den inzwischen erschienenen französischen und englischen Ausgaben durchgreifende Verbesserungen und Vermehrungen erfahren. Insbesondere sind diesmal die Wicklungen weit ausführlicher behandelt worden; auch war es mir dank des freundlichen Entgegenkommens einer Anzahl Firmen möglich, den ausländischen Konstruktionen etwas mehr Rechnung zu tragen, als dies in den früheren Auflagen der Fall war. Es sei ihnen hierfür mein verbindlichster Dank ausgesprochen.

Als neue Kapitel sind hinzugekommen Kap. VII über die Bogenlichtmaschinen und Kap. VI über die Kommutation. Letzteres musste dem heutigen Standpunkte dieser Frage entsprechend neu geschrieben werden.

Leider reichte die Zeit nicht mehr aus, um auch die Abschnitte über Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme umzuarbeiten und musste ich mich darauf beschränken, die etwas genaueren neueren Formeln summarisch in Kap. XI anzugeben.

Mit Rücksicht darauf, dass dieses Buch bereits in einer grösseren Zahl von technischen Lehranstalten als Hilfsmittel benutzt wird, hielt ich es geraten, einige Definitionen und Erklärungen präziser abzufassen und überdies eine kleine Verschiebung in der Reihenfolge der Abschnitte eintreten zu lassen, wodurch das Ganze nur an Zusammenhang gewinnen konnte.

Mein spezieller Dank gebührt schliesslich der Verlagsbuchhandlung, welche keine Kosten gescheut hat, um dem Werke eine würdige Ausstattung zu geben.

Le Raincy, S. et O. (près Paris), März 1899.

J. Fischer-Hinnen.

Allgemeine Bezeichnungen.

Der Verfasser hat es versuchen wollen, die allgemeine Bezeichnungsweise, wie sie vom Elektriker-Kongress in Chicago (1893) aufgestellt wurde, zu adoptieren, konnte jedoch diese Absicht nur zum geringsten Teile ausführen, weil einerseits die in Aussicht genommenen Bezeichnungen für den vorliegenden Fall nicht ausgereicht hätten und anderseits die Benutzung von fett gedruckten Buchstaben neben gewöhnlichen in der nämlichen Gleichung die Deutlichkeit entschieden beeinträchtigt. Er zieht es deshalb vor, die nachstehende, besser zu behaltende und auch allgemeiner bekannte Schreibweise beizubehalten und konsequent durchzuführen. Hierbei sind sämtliche Masse in Centimetern zu verstehen, wenn nichts besonderes bemerkt ist.

- aw Ampère-Windungen (siehe $\mathfrak{J}m$).
- B Kraftlinien pro cm².
  - B_a in der Armatur,
  - B_m in den Magneten,
  - B_l in der Luft.
- b Polbogenlänge.
- $\mathfrak{b}$ Riemenscheibenbreite in cm.
- C magnetische Leitungsfähigkeit, in Kap. IV Kapazität in Mikrofarad.
- c halber Abstand zweier Polspitzen.
- D Äuss. Armaturdurchmesser.
- D' Durchmesser des Fusskreises der Armaturzacken.
- D_1 Innerer Armaturdurchmesser.
- D_2 Durchmesser des Kommutators in cm.
- d Drahtdurchmesser in mm.
- $\mathfrak{d}$ Wellendurchmesser in cm.
- E_1 Klemmenspannung.
- E, e Spannung in Volt.
- f Reibungskoeff. (0,05—0,06).
- G Gewicht in kg.
- H Magnetmotor. Kraft $= \frac{4\pi}{10} aw$
- J Strom in Ampère, spez. Armaturstrom.
- $\mathfrak{J}$ Strom in Ampère, spez. Magnetstrom.
- $\mathfrak{J}m$ $= aw$, Ampère-Windungen, spez. aw per magnetischen Stromkreis.
- i Strom in Ampère, im spez. Stromintensität = Amp. pro mm², in Kap. V mit Rücksicht auf die vorhandenen Clichés = Magnetstrom $\mathfrak{J}$.
- K Streuungskoeff. an d. Magnetpolen, in Kap. VI auch blosser Koeffizient.
- k aw pro cm Armaturumfang.
- k_m max. zulässig. aw pro Armaturumfang.
- L Kraftlinienlänge, in spez. Fällen Selbstinduktionskoeff. (Kap. VI).
- $\mathfrak{L}$ Länge einer Windung in m.
- l Armaturlänge.
- l_1 Länge des Kommutators.
- m Anzahl Windungen pro Magnet.
- N Anzahl Drähte auf der Armatur.
- N_1 Anzahl Armaturabteilgn. (Zacken).
- N_2 Anzahl Kommutatorsegmente.
- n Tourenzahl pro Minute.
- P Kraft in kg.
- $2p$ Anzahl Pole.

$2p_1$ Zahl der parallelen Stromkreise.
Q Elektrizitätsmenge in Coulombes.
R, r Widerstand in Ohm (Ω).
In Kap. VI bedeutet
r den Kontaktwiderstand der Bürsten,
r_1 und r_2 die variablen Kontaktwiderstände,
r_3 den Widerstand der Windungen zwischen 2 Lamellen.
$\mathfrak{R}$ magnetischer Widerstand, an einigen Stellen gleich Radius in cm.
S Querschnitt, auf Magnete angewandt gleich Summe der Querschnitte sämtl. Magnetstromkreise, welche Linien nach dem gleichen Pol hin senden.
s Drahtquerschnitt in mm², in Kapitel VI (S. 217) gleich Bürstenfläche in cm² pro Ampère.
T, t Zeit in Sekunden.
V Volumen in cm³.
v Geschwindigkeit in m per Sek.
W Watt, oder, wenn besonders angegeben, auch Kilowatt.
W_s spez. Leistung (Leistung in Kilowatt bei 1000 Touren).
w Wattverlust.
w_a Ohmscher Armatur-Verlust.
w_f Verlust durch Foucaultströme.
w_h Hysteresisverlust.
w_r Reibungsverlust.
w_m Verlust in den Magneten.
Z Zugkraft in kg.

α Winkel oder Koeffiz., bei Trammotoren Traktionskoeff. (10—15).
β Winkel oder Koeff., spez. $= \frac{b \cdot 2p}{D\pi}$
γ Bogen, welchen die Bürsten am Kommutatorumfang umfassen, in cm, oder auch blosser Koeffiz.
γ_1 Dicke einer Kommutatorlamelle in cm.
δ Einfacher Luftabstand der Pole vom Armatureisen.
ε Spannungsverlust in Bruchteilen der ganzen Spannung (z. B. 0,02—0,06).
ζ Nutzeffekt (z. B. 0,8), $\zeta \times 100$ Nutzeffekt in %.
η Hysteresiskoeffiz. von Steinmetz (z. B. 0,002)
λ $= \frac{l}{D}$, Verhältnis der Armaturlänge zum Durchmesser.
μ Permeabilität.
ν Hopkinson'scher Streuungskoeffiz. (z. B. 1,1—2).
ξ siehe Fig. 153.
ϱ Spezif. Widerstandskoeffiz., für Kupfer $= \frac{1}{60}$.
σ Widerstandszunahme pro C°.
τ $= \frac{D_i}{D'}$ = Innerer Armaturdurchmesser, geteilt durch den Durchmesser d. Fusskreises d. Zacken.
τ_1 $= \frac{D_i}{D}$ = Innerer Armaturdurchmesser, geteilt durch äusseren.
Φ Linienzahl, spez. Linien pro Pol.
Ω Widerstandseinheit in Ohm,
ω Perioden-(Cycle-)Zahl per Sekunde $= \frac{pn}{60}$.

Inhaltsverzeichnis.

I. Allgemeine theoretische Ableitungen.

A. Entstehung von Elektromagneten.

Jeder stromdurchflossene Leiter von beliebiger Gestalt erzeugt magnetische Kraftlinien, welche um den Leiter als Axe kreisen.

Ob man sich zwar eine wirkliche Bewegung der Kraftlinien vorstellen darf, bildet gegenwärtig noch eine Streitfrage und es scheint beinahe wahrscheinlicher, dass die Kraftlinien nach ihrem Entstehen einen ruhenden Zustand annehmen. Nichtsdestoweniger wollen wir jenen vielleicht etwas unpassenden Ausdruck des „Kreisens" beibehalten, weil sich dadurch manche Erklärungen auf weit einfachere Weise geben lassen.

In sehr starkem Masse äussert sich diese Erscheinung, wenn wir den Leiter bei einem magnetisierbaren Körper, z. B. einem Eisenstabe, vorbei oder um denselben herum führen (Fig. 1); dadurch wird der Eisenstab während der Dauer des Stromes zu einem Elektromagneten von genau den gleichen Eigenschaften wie ein gewöhnlicher Stahlmagnet.

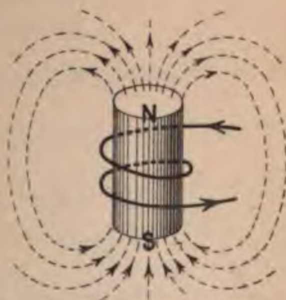


Fig. 1.

Schaut man nach der Richtung des Stromes im Leiter, so wird hierbei angenommen, es finde ein Kreisen der Kraftlinien um den Leiter im Sinne des Uhrzeigers statt, und man bezeichnet mit **Nordpol** dasjenige Ende des Eisenstabes, von welchem die Kraftlinien ausgehen. Das entgegengesetzte Ende heisst magnetischer **Südpol.**

Wird der stromdurchflossene Leiter um den Eisenstab herumgeführt, so mag für die Bestimmung der Pole auch noch eine weitere von Ampère angegebene Regel benützt werden:

Betrachtet man die Windung von einem der beiden Pole aus, und hat der durch dieselbe fliessende Strom die Richtung des Uhrzeigers, so ist der betreffende Pol ein Südpol; ist dagegen die Stromrichtung umgekehrt zu derjenigen des Uhrzeigers, so bildet das fragliche Stabende einen Nordpol.

Als Mass für die Stärke des Magnetismus gilt die durch die Flächeneinheit (cm^2) gehende Anzahl Kraftlinien (**Intensität** der Kraftlinien).

Anmerkung. Wenn man von einem Pole im allgemeinen spricht, versteht man darunter einen Punkt, von welchem alle Kraftlinien ausgehen. Da nun für die Einheit der Kraftliniendichte eine Kraftlinie pro Flächeneinheit kommt und die Oberfläche der um den Pol gebildeten Kugel mit dem Radius Eins gleich 4π ist, so gehen folglich vom Einheitspole 4π Kraftlinien aus.

Die Gesamtzahl der Kraftlinien, die von einem Pole von der Stärke P austreten, wird also

$4\pi P$ sein.

Die magnetisierende oder elektromagnetische Kraft kann ferner noch dadurch erhöht werden, dass man auf den Eisenstab statt einer einzelnen Windung eine grössere Zahl fortlaufend gewickelter Windungen anbringt.

Bedeutet $\mathfrak{J}$ den Strom in Ampère, welcher durch die Spirale fliesst,

L die Länge der Spule in cm

m die Anzahl Windungen,

so ist die magnetisierende Kraft

(1) $$H = \frac{4\pi}{10} \frac{\mathfrak{J} m}{L},$$

die Feldintensität, d. h. die Anzahl Kraftlinien pro cm^2 im Innern der Spule

(2) $$B = \mu . H,$$

worin der Koefficient μ die „Permeabilität“ oder magnetische Leitungsfähigkeit der von der Spule umfassten Materie bedeutet.

Enthält die Spule kein Eisen, so ist $\mu = 1$; für Eisen variiert dieselbe je nach dem Sättigungsgrade zwischen 50 bis 2000, d. h. sie ist 50 bis 2000 mal grösser als die Luft.

Hat die Spule einen Querschnitt von $S\,cm^2$, so beträgt die totale Zahl der Kraftlinien

(3) $$\Phi = \frac{4\pi}{10} \frac{S\mu}{L} . \mathfrak{J} m,$$

oder allgemein

$$\Phi = \frac{\mathfrak{J} m}{\mathfrak{R}}, \quad (4)$$

worin $\mathfrak{R}$ den magnetischen Widerstand darstellt.

Den Faktoren $\mathfrak{J} m$ bezeichnet man allgemein mit dem Ausdrucke Ampère-Windungen ($a w$).

Die magnetisierende Kraft bleibt die gleiche, wie immer auch die beiden Glieder $\mathfrak{J}$ und m gewählt werden, solange ihr Produkt $\mathfrak{J} m$ einen unveränderlichen Wert beibehält.

Magnetisches Feld heisst man die Umgebung eines Magneten; wird indessen bei Dynamomaschinen speziell für den Raum zwischen den beiden Polen angewandt.

Wird ein Magnet derart umgebogen, dass die Pole einander direkt gegenüber zu stehen kommen und ihre Flächen parallel sind, so kann angenommen werden, dass sich die Kraftlinien auf die Polfläche vollständig gleich verteilen; es entspricht dies dem Begriffe eines homogenen magnetischen Feldes (Fig. 2).

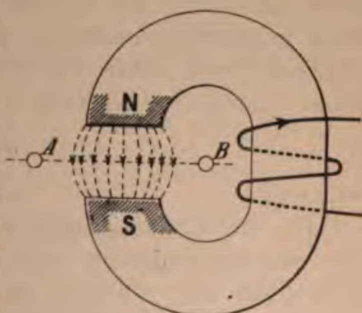


Fig. 2.

Anmerkung. Das Feld einer Dynamomaschine ist nur so lange homogen, als sich die stromlose Armatur im Felde befindet; ferner müssen die Pole konzentrisch zur Armatur ausgebohrt sein.

B. Induktionserscheinungen.

1. Entstehung von elektromotorischen Kräften und Strömen.

Bringt man in eine Röhre aus leitendem Material einen Draht, dessen beide Enden mit einem Galvanometer verbunden werden (Fig. 3) und schickt man durch die Röhre einen Strom, so werden, wie oben nachgewiesen, Kraftlinien erzeugt, welche um die Röhre und den darin befindlichen Leiter kreisen. Wir machen aber dabei noch eine weitere Beobachtung: Im Momente des Entstehens der Kraftlinien zeigt sich am Galvanometer ein Ausschlag, der davon herrührt, dass in dem Leiter ein Strom entstanden ist. Dieser Strom hat nur so lange Dauer



Fig. 3.

als durch Variation des Stromes in der Röhre eine Änderung von Kraftlinien stattfindet. Hält man den magnetischen Strom eine Weile konstant, so sinkt der Induktionsstrom auf Null herunter. Wird diese Änderung der Kraftlinien sehr rasch vollzogen, so fällt auch der Ausschlag um so stärker aus.

Es wird also dadurch, dass man um einen Leiter magnetische Kraftlinien von variabler Intensität kreisen lässt in dem ersteren eine **elektromotorische Kraft** (E.M.K.) induziert. Die Grösse dieser E.M.K. hängt aber, wie wir soeben gesehen haben, nicht etwa von der momentanen Kraftlinienzahl ab, welche den Leiter umfassen, sondern ist durch die Grösse der Änderung bestimmt, welche während dem in Frage kommenden unendlich kleinen Zeitraum hervorgebracht wird. Allgemein wird daher die E.M.K. E, zu einer beliebigen Zeit gemessen, durch die Gleichung

(5) $$E = \frac{d\Phi}{dt}$$

dargestellt.

Ist die Kraftlinienzunahme oder -abnahme eine gleichmässige, oder darf sie wenigstens während einem sehr kleinen noch messbaren Zeitintervall $\triangle t$ praktisch als constant betrachtet werden, so kann die induzierte Spannung leicht derart bestimmt werden, dass man die momentanen Linienzahlen

$$\Phi_0, \ \Phi_1, \ \Phi_2 \text{ etc.}$$

zur Zeit

$$0, \ \Delta t, \ 2\Delta t, \ 3\Delta t, \text{ etc.}$$

als Funktion der momentanen primären Stromstärke ermittelt und hieraus den Quotienten

$$E_0 = \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{\Delta t}; \qquad E_1 = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} \text{ etc.}$$

ausrechnet.

Eine zweite Art und Weise E.M.Ke. zu induzieren besteht darin, dass man eine Windung so in einem ruhenden Felde von ungleichmässig verteilter Intensität bewegt, dass sich die Zahl der in die Spule eintretenden Linien beständig ändert. Die gleichen Formeln, die wir oben benutzten, sind natürlich auch auf diesen Fall anwendbar, da es sich vollständig gleich bleibt, auf welche Weise die Kraftlinienänderung hervorgebracht werde.

In diesem Falle wird die Kraftlinienänderung am einfachsten auf folgende Weise ermittelt: Statt die Windung als Ganzes ins Auge zu fassen, betrachten wir die beiden Drähte, aus denen sie zusammengesetzt ist, gesondert, und untersuchen, welche Änderung in der Gesamtzahl der Kraftlinien jeder einzelne Draht beim Schneiden des Feldes hervorbringt.

Es handle sich z. B. um ein Feld von der Gestalt Fig. 4, in welchem eine Windung mit der Geschwindigkeit v cm pro Sekunde verschoben wird.

l sei die Länge eines Drahtes senkrecht zur Papierebene,

B und B_1 die Kraftliniendichten in a und b.

Nehmen wir Δt klein genug an, so darf auch die Kraftlinienintensität für die Länge $a a_1$ bezw. $b b_1$ konstant angenommen werden.



Fig. 4.

Die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche durch die Spule fliesst, nimmt daher in der Zeit Δt um

$$v \Delta t l B$$

zu und

$$v \Delta t l B_1$$

ab.

Somit ergiebt dies eine wirkliche Änderung

$$= v \Delta t l (B - B_1)$$

der eine E.M.K.

$$E = \frac{v \Delta t l (B - B_1)}{\Delta t} = v l (B - B_1) \tag{6}$$

entspricht.

Die Gleichung (6) zeigt auch sofort, wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn sich nur der eine Draht der Windung im Felde bewegt. Für diese Annahme wird $B_1 = O$ und die obige Gleichung geht über in

$$E = v . l B \tag{7}$$

Setzt sich die Spule aus einer grösseren Zahl N Windungen zusammen, so ist natürlich das Produkt mit N zu multiplizieren, ferner muss das Ganze noch durch 10^8 dividiert werden, um die Spannung in **Volt** zu erhalten. (siehe nächsten Abschnitt.)

Wir haben es bisher vermieden von induzierten Stromstärken zu sprechen. Die elektromotorischen Kräfte können nämlich auftreten, ohne dass sie notwendiger Weise von einem Strome begleitet sein müssen, ebenso wie in einer Wasserröhre ein Druck herrschen kann, ohne dass das Wasser zu zirkulieren braucht.

Verbinden wir die beiden Enden des genannten Drahtes durch einen zweiten Leiter, welcher sich jedoch nicht im Bereiche der induzierenden Wirkung der Kraftlinien befindet, so erhalten wir sofort einen **elektrischen Strom**, dessen **Stromstärke** J direkt proportional der Spannung E und umgekehrt proportional der Summe der **Widerstände** R beider Leiter ist.

(8) $$J = \frac{E}{\Sigma R}$$

(Ohm'sches Gesetz).

Der elektrische Effekt dieses Vorganges ist

(9) $$J.E = J^2.R = \frac{E^2}{R}$$

(Gesetz von Joule).

Multiplizieren wir beide Seiten von Gleichung (7) mit J, so erhalten wir links einen Ausdruck für die in der Zeiteinheit geleistete Arbeit, rechts ein Produkt aus einer Grösse v, welche den Weg darstellt, und BlJ, welche als Zugkraft aufzufassen ist, die bei diesem Vorgang aufgewendet werden muss.

Die **Richtung** des induzierten Stromes hängt von der Richtung ab, in welcher die Kraftlinien geschnitten werden und kann mit Zuhülfenahme etwelcher gymnastischer Imagination nach der Faraday'schen Regel bestimmt werden:

„Denkt man sich derart in das magnetische Feld gelegt, dass die Kraftlinien zu den Füssen ein- und zum Kopfe austreten, und sieht man nach der Direktion der Bewegung, so ist der induzierte Strom stets nach rechts gerichtet".

Hierbei bezeichnet man als die positive Richtung der Kraftlinien, wie bereits angedeutet, jene, in welche sich der Nordpol einer in das magnetische Feld gebrachten Magnetnadel stellen würde, also die Richtung vom magnetischen Nordpole nach dem Südpole.

Hält man an der Definition fest, dass zur Erzeugung einer E.M.K. ein Kreisen von Kraftlinien um den Leiter erforderlich sei, so lässt sich auch für diese Annahme eine Stromrichtungsregel aufstellen:

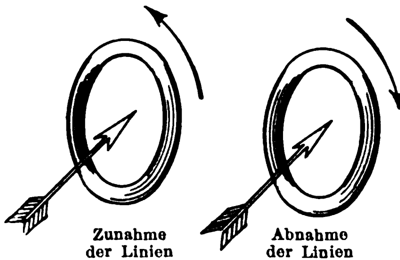


Fig. 5.

Betrachtet man die Spule in der Richtung der eintretenden Kraftlinien und findet bei der angenommenen Bewegung eine Abnahme der Gesamtzahl der Kraftlinien statt, so hat der Strom die Richtung des Uhrzeigers (Fig. 5).

Anmerkung. Handelt es sich um einen einzelnen Draht, so können wir uns denselben stets zu einer vollständigen Windung ergänzt denken, welche den Kraftlinienstrom umfasst.

2. Die Dynamomaschine.

Nachdem wir in dem vorangehenden die wichtigsten Gesetze behandelt haben, welche den elektromagnetischen und induktiven Er-

scheinungen zu Grunde liegen, so haben wir uns hier etwas näher mit der industriellen Verwertung dieses Grundgedankens zu befassen.

Der Umstand, dass die praktische Dynamomaschine ihrer Theorie um einige Jahrzehnte vorauseilte, war insofern für ihre Entwicklung von bedeutendem Nachteile, als jeder Fortschritt erst durch zeitraubende und kostspielige Versuche erkauft werden musste, die nicht selten wieder infolge der Unklarheit, welche damals über die Grundbedingungen dynamischer Elektrizität herrschte, missverstanden wurden, und zu Trugschlüssen Veranlassung gaben. Es wäre ohne Zweifel interessant, die verschiedenen Entwicklungsstadien zu verfolgen, welche die Dynamomaschine durchzumachen hatte, bevor sie ihren heutigen Grad der Vervollkommnung erreicht hat, der Zweck dieses Buches gestattet uns jedoch nicht, auf alle die Einzelheiten dieser Entwicklungsgeschichte einzutreten.

Wir wenden uns daher gleich zu der modernen Gleichstrommaschine.

So verschieden die heutigen Gleichstrommaschinen hinsichtlich äusserer Form, Bewicklung und Konstruktion sein mögen, so besitzen sie als gemeinsames Merkmal das feststehende Magnetfeld und die rotierende Armatur mit Kommutator, in deren Wicklung durch die Drehung, bezw. durch die Änderung der Kraftlinien, welche durch die Wicklung fliessen, eine E.M.K. erzeugt wird.

Alle Versuche, welche dahin zielten, die Armatur feststehend zu gestalten, sind an der Kompliziertheit dieses Systemes gescheitert.

Wir wollen nun untersuchen, in welcher Weise sich die bereits bekannten Induktionsgesetze auf Drähte anwenden lassen, welche in einem Felde rotieren.

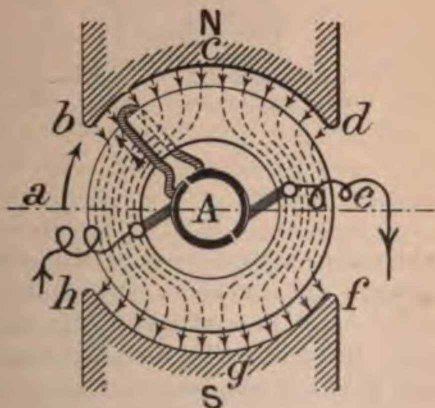


Fig. 6.

In Fig. 6 bedeutet *NS* das stehende Magnetfeld, *A* die rotierende Armatur, auf welcher wir vor der Hand nur eine einzige Windung voraussetzen. Die Armatur kann entweder aus isolierten Blechscheiben oder Eisendrähten gedacht werden. Auf die Bedeutung der Isolation der Eisenscheiben werden wir später zurückkommen. Da das Eisen für das Durchpassieren der Kraftlinien einen bedeutend geringeren magnetischen Widerstand entgegensetzt, als die Luft, werden folglich alle vom Pole *N* austretenden Linien ihren Verlauf durch das

Eisen nehmen. Betrachten wir die Kraftlinienverteilung auf der Oberfläche der Armatur, so finden wir die grösste Kraftliniendichte zwischen den Polflächen und dem Armatureisen, weil hier auch der Abstand am kleinsten ist. Wir haben hier also den Fall eines homogenen Feldes. Links und rechts von den Polenden bd und fh nimmt dagegen die Kraftliniendichte rasch ab und kann in der neutralen Zone ae gleich Null betrachtet werden.

Es sei allgemein B die Kraftlinienintensität eines beliebigen Punktes des Armaturumfanges.

Lassen wir die Armatur mit ihrer Spule rotieren, so ändert sich fortwährend die Kraftlinienzahl, welche durch dieselbe fliesst. Es wird folglich in derselben eine E.M.K. entwickelt, deren momentaner Wert durch die bereits bekannte Gleichung (7) bestimmt ist:

$$e = \frac{v\,l\,B}{10^8}$$

$$v = \frac{D\pi n}{60}.$$

D = Armaturdurchmesser in cm.

n = Umdrehungen pro Minute.

Wir beobachten ferner, dass die Kraftlinienzahl in der Spule für die angegebene Drehrichtung von g—a und von c—e zunimmt und

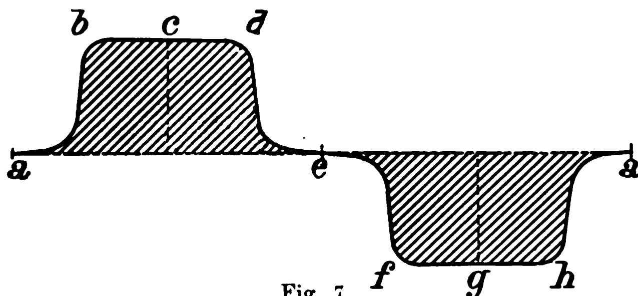


Fig. 7.

zwischen a—c und e—g wieder abnimmt. Während jedoch beim Passieren der Punkte a und e die Kraftlinienrichtung unverändert bleibt, findet in c und g gleichzeitig eine Änderung dieser Richtung statt. Bei einer vollen Drehung kehrt daher der Strom nur zweimal seine Richtung um, und zwar bei a und e.

Trägt man die E.M.K. für alle Lagen graphisch auf, so gelangt man zu der in Fig. 7 veranschaulichten Spannungskurve.

Um aus diesem Wechselstrom einen gleichgerichteten Strom zu erhalten, wandte schon Pixii bei seiner im Jahre 1832 konstruierten ersten Dynamomaschine einen sogenannten Kommutator an, der inzwischen wesentliche Verbesserungen erfahren hat.

Die einfachste Form eines Kommutators[1]) besteht in der Hauptsache aus 2 rotierenden Kontaktstücken, welche mit dem Ende der Spule verbunden sind, und von denen der Strom mittelst zweier feststehender Bürsten abgenommen wird. Die Bürstenstellung muss nun derart gewählt werden, dass die Bürsten im Momente, wo die Stromumkehr eintritt, die Lamellen wechseln (s. Fig. 8).

Bei der in Fig. 6 gewählten Anordnung umfasst die Spule nur die halbe Zahl Linien, welche von einem Pole austreten. Wir können aber auch die Spule um die ganze Armatur herumführen, wie dies in Fig. 8 geschehen ist.

Die erstere heisst man Ringwicklung, die letztere Trommelwicklung.

Wir machen auch beiläufig die Beobachtung, dass die Bürsten bei der Trommelwicklung eine andere Lage einnehmen, als bei der Ringwicklung, doch ist diese Regel keineswegs absolut massgebend, da wir ohne weiteres den Kommutator samt den Zuleitungen gegenüber den induzierten Drähten verdrehen könnten.

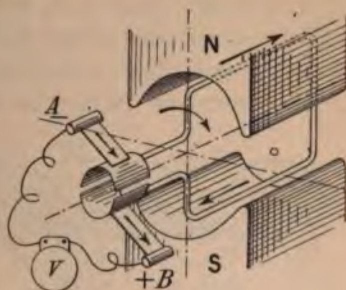


Fig. 8.

Der zweiteilige Kommutator ist heute nur noch bei ganz kleinen Motoren von einigen Zehnteln Pferdekräften im Gebrauch, speziell in Verbindung mit der bekannten Siemens'schen Doppel-T-Armatur. Es haftet ihm nämlich der grosse Fehler an, dass die Spannung und mit ihr die Stromstärke während einer ganzen Umdrehung sehr stark variiert und für einen Moment sogar gleich Null wird. Diesem Übelstande kann dadurch abgeholfen werden, dass man eine grössere Anzahl gleichmässig auf dem Armaturumfang verteilte Wicklungen derart unter einander und mit einem mehrteiligen Kommutator verbindet, dass zwischen den beiden Bürsten stets mehrere Spulen verschiedener Spannungen hintereinander geschaltet sind. Die hauptsächlichsten derartigen Wicklungen sind im nachfolgenden Kapitel II beschrieben; alle haben die gemeinsame Eigentümlichkeit, dass sie eine oder mehrere geometrisch in sich geschlossene Figuren bilden. Man bezeichnet sie daher mit dem Namen geschlossene Wicklungen. Eine zweite charakteristische Eigenschaft derselben besteht darin, dass zwischen

---

[1]) Der Kommutator von Gleichstrommaschinen wird auch häufig mit Kollektor bezeichnet. Wir folgen hier dem englischen Sprachgebrauche, der in dieser Beziehung strikter ist und die Bezeichnung Kollektor auf die sogenannten Schleifringe begrenzt.

zwei Bürsten mindestens zwei parallele Stromkreise entstehen. Auf die sogenannten offenen Wicklungen, bei denen alle Windungen hintereinander geschaltet sind, werden wir anlässlich der Bogenlichtmaschine (Kap. VII) näher eintreten, da sie ausser für diesen speziellen Zweck nie benutzt werden.

Wie aus dem Spannungsschema (Fig. 9) hervorgeht, kann schon bei Anwendung eines vierteiligen Kommutators die Spannung nicht mehr auf Null sinken, sondern variiert hier zwischen den Grenzen E und $\sqrt{2}\,E$.

Vermehrt man die Lamellenzahl noch mehr, so fällt auch die Differenz entsprechend kleiner aus.

Bestimmt man die Klemmenspannung aus der Summe der Spannungen der einzelnen Spulen für eine ganze Kommutationsperiode, so liesse sich schliesslich ohne allzu grosse Schwierigkeit die Grösse der Ondulation abschätzen, welche der Strom erfährt. Wir sagen abschätzen, denn eine genaue Rechnung ist hier infolge eines Umstandes ausgeschlossen, dem wir später bei der Besprechung des Spannungsabfalles besondere Aufmerksamkeit zu schenken haben werden. Infolge der Wechselwirkung, welche zwischen Elektromagnetismus und Induktion herrscht, erzeugt der ondulierende Strom, oder besser gesagt, das davon herrührende variable Magnetfeld des Ankers in den Armaturwindungen E.M.Ke., welche sich dem Anwachsen und Abnehmen des Stromes entgegensetzen. Daher kommt es, dass der Strom schon bei einer verhältnismässig sehr geringen Lamellenzahl, 16—20, praktisch als konstant angenommen werden darf.



Fig. 9.

Um die allgemeine Spannungsformel für geschlossene Wicklungen abzuleiten, bedienen wir uns der Figur 10.

Die Armatur drehe sich in einem bestimmten Sinne mit der Geschwindigkeit

$$v = \frac{D\,\pi\,n}{60}\ \text{cm}.$$

In den sämtlichen Drähten zwischen A und B findet, wie ersichtlich, keine Änderung statt, sofern wir von der verhältnismässig geringen Wirkung der Streulinien absehen. Es wird folglich in diesen Drähten auch keine oder nur eine zu vernachlässigende Spannung erzeugt. Anders verhält sich die Sache bei den unter den Polen liegen-

den Drähten. Dieselben bewegen sich in der Sekunde um die Strecke v cm. Es gehen daher, je nachdem sich der Draht links oder rechts von C befindet, per Sekunde $v . B . l$ Kraftlinien weniger oder mehr um jeden einzelnen Leiter.

Bis C nimmt die Kraftlinienzahl ab, von da an zu; die Stromrichtung bleibt indessen unverändert, da sich die Richtung der Kraftlinien umgekehrt hat (vergl. Stromrichtungsregel Seite 6).

Die Spannung jedes einzelnen induzierten Leiters ist

$$e = v B l,$$

und da auf der ganzen Armatur

$$\frac{2 p . b}{D \pi} . N$$

Drähte induziert werden, wobei p gleich der Zahl Polpaare ist, so ergiebt sich hieraus eine gesamte Spannung

$$E = v . B l . \frac{2 p b}{D \pi} . N = \frac{2 n . B l b . N}{60} p.$$

Um die Spannung in Volt zu erhalten, muss das Produkt noch durch 10^8 dividiert werden.

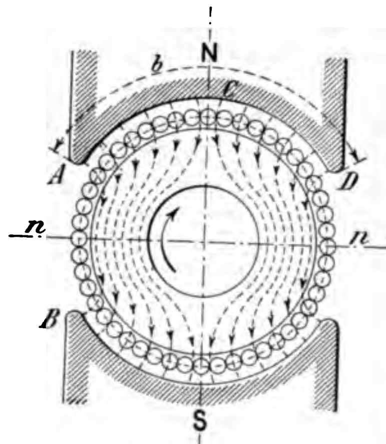


Fig. 10.

Diese Gleichung erleidet, auf gewöhnliche Gleichstrommaschinen angewendet, noch eine kleine Modifikation: Wir bezeichnen zunächst $B l b$, d. h. die Gesamtzahl der von einem Pole austretenden Linien mit Φ. Ferner liegt es, wie bereits erwähnt wurde, in der Natur der Gleichstromwicklungen, dass stets mindestens so viele parallel geschaltete Stromkreise in der Armatur entstehen, als Bürstenstifte vorhanden sind. Bedeutet daher $2 p_1$ die Zahl der parallelen Stromzweige, so ist folglich die Spannung zwischen zwei Bürsten nur

$$\frac{1}{2 p_1}$$

von der in obiger Formel angegebenen Spannung.

Wir gelangen daher zu der wichtigen Gleichung:

$$(10) \qquad E = \frac{n \Phi . N}{60 . 10^8} . \frac{p}{p_1} \text{ Volt.}$$

E heisst man die interne Spannung oder E.M.K.; die externe oder Bürstenspannung ist gleich der internen weniger dem Voltverluste in der Armatur (siehe Kap. II B) und dem Spannungsabfall erzeugt durch die Armaturreaktion.

Diese Formel hat, wie schon die Ableitung zeigt, gleiche Gültigkeit für Ring- und Trommelarmaturen, insofern für N nicht die Anzahl Windungen, sondern Drähte am Umfang der Armatur eingesetzt werden.

Es erübrigt uns noch kurz den anderen Hauptbestandteil der Gleichstrommaschine, die Magnete zu besprechen.

Das Verdienst, zum ersten Male den Armaturstrom zur Erregung der Magnete benutzt zu haben, gebührt allem Anschein nach Brett und Sinsteden und fällt noch in die Jahre 1848—1851 zurück. Wie es nun aber so oft geschieht, fielen diese ersten Versuche wieder der Vergessenheit anheim und gelangten erst zur Bedeutung, als 16 Jahre später Werner Siemens und Wheatstone auf den gleichen Gedanken kamen (Proc. Roy. Soc. 14. Febr. 1867).

Siemens schlug vor, den gesamten Armaturstrom um die Magnete zu leiten, während Wheatstone nur einen Teil davon benutzte. Es entstanden auf diese Weise die Serie-Maschine und die Nebenschluss- oder Shunt-Maschine, zu der später noch die Compound-Maschine (Brush) hinzu kam, bei welcher beide Methoden gleichzeitig verwendet wurden. Um nicht dem naturgemässen Lehrgange allzusehr vorzugreifen, muss hier auf eine eingehende Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften dieser Wicklungsarten verzichtet werden.

Es genügen hier folgende vorläufige Bemerkungen:

Da bei der Seriemaschine der gesamte Hauptstrom die Wicklung durchläuft, hat jede Änderung des äusseren Widerstandes eine Änderung der Stromstärke zur Folge und gleicherweise eine Vergrösserung oder Verkleinerung der Feldstärke und der Klemmenspannung. Bei den Nebenschlussmaschinen dagegen sind die Magnete parallel zum äusseren Stromkreise geschaltet. Der Erregerstrom wird daher vom äusseren Stromkreis beinahe garnicht beeinflusst, da der Widerstand der Magnete stets der gleiche bleibt. Nebenschlussmaschinen arbeiten daher mit annähernd konstantem Felde und konstanter Spannung. Noch besser wird dieser Zweck schliesslich bei der Compoundmaschine erreicht.

3. Motoren.

Wir haben bisher von der Erzeugung elektrischer Induktionsströme gesprochen. Wir können nun aber auch umgekehrt annehmen, es befinde sich ein Leiter in ruhendem Zustande innerhalb dem magnetischen Felde.

Bringen wir seine beiden Enden mit einer Stromquelle von gegebener Spannung e in Verbindung, so entsteht zunächst ein Strom von der maximalen Stärke

$$J = \frac{e}{R}$$

wo R den Widerstand des Leiters nebst Verbindungen bedeutet.

Ferner wird auf den Leiter eine Zugkraft

$$Z = J \,.\, l \,.\, B \text{ Ergs} = \frac{J l B}{9{,}81 \,.\, 10^6} \text{ kg}^{1)} \tag{11}$$

ausgeübt, welche ihn senkrecht zur Richtung der Kraftlinien in Bewegung versetzt, und zwar ist die Bewegungsrichtung gerade entgegengesetzt zu derjenigen, welche dem Drahte als Generator verliehen werden musste, um einen gleichgerichteten Strom zu erhalten.

Diese Erscheinung kann auf einfache Weise an Figur 11 erklärt werden.

O sei der stromdurchflossene Leiter, der senkrecht zur Papierebene angenommen werden muss. Fliesst der Strom in demselben in der Richtung gegen das Papier hin, so erzeugt er Kraftlinien, welche um den Leiter im Sinne des Uhrzeigers kreisen. Es entsteht folglich eine Kraftlinienverdichtung rechts von ab und eine Verminderung der Intensität links von ab, wodurch der Draht nach links verdrängt wird.

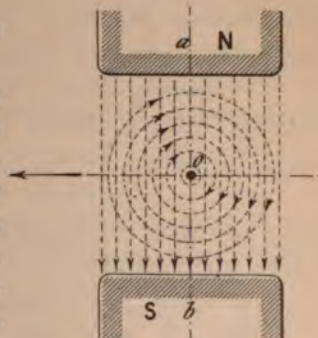


Fig. 11.

Die Geschwindigkeit nimmt äusserst rasch zu und nähert sich schliesslich dem Werte

$$v = \frac{e}{l B} \,.\, 10^8.$$

Würde auf dem Drahte ausser der Reibung kein mechanischer Widerstand ausgeübt, so kann nun beobachtet werden, dass die Stromstärke nach Erreichung jener Geschwindigkeit auf einen sehr kleinen Wert heruntersinkt, obwohl weder an der Spannung, noch am Widerstande des Drahtes etwas geändert wurde. Diese Erscheinung erklärt sich einfach dadurch, dass der Draht bei seiner Bewegung die Rolle eines Generators übernimmt. Da aber nach dem soeben ausgesprochenen Gesetze die als Generator induzierte sogenannte gegenelektromotorische Kraft e_1 umgekehrte Richtung, wie die Klemmen-

[1]) Bezüglich der Verhältnisse zwischen absoluten und praktischen Einheiten siehe Seite 16.

spannung e hat, so nimmt auch die resultierende Spannung $e - e_1$ mit zunehmender Geschwindigkeit ab.

In irgend welchem Momente ist daher die Stromstärke durch die Gleichung:

$$(12) \qquad J = \frac{1}{R}\left(e - \frac{v\,l\,B}{10^8}\right)$$

gegeben, wenn wir mit v allgemein die Geschwindigkeit bezeichnen.

Umgekehrt ist:

$$(13) \qquad v = \frac{E - JR}{lB} \cdot 10^8$$

Die Bewegungsrichtung findet man nach der folgenden Regel:

Man denke sich derart in das magnetische Feld gelegt, dass die Kraftlinien zu den Füssen ein- und zum Kopfe austreten, und sieht in der Richtung des durch den Leiter fliessenden Stromes; der ausgestreckte rechte Arm giebt dann die Richtung der Bewegung an.

Die Formel 10 lässt sich auch auf elektrische Motoren zur Bestimmung der Tourenzahl anwenden:

$$n = \frac{E_1 \cdot 60 \cdot 10^8}{N \cdot \Phi} \cdot \frac{p_1}{p},$$

worin E_1 für die Klemmspannung weniger dem Spannungsabfall steht (vergl. Gleichung 13).

Das heisst: Je grösser die Bürstenspannung am Motor ist, um so grösser fällt auch seine Tourenzahl aus; umgekehrt lässt sich die Tourenzahl durch Verstärkung des magnetischen Feldes erniedrigen und umgekehrt. Beide Methoden werden zur Regulierung der Geschwindigkeit von Motoren benutzt.

* * *

Der Rechnungsgang, welcher beim Entwurfe von Gleichstrommaschinen einzuschlagen ist, dürfte nach dem Gesagten ziemlich klar vorgezeichnet sein. Wir erkennen insbesondere auch die Wichtigkeit, welche der Gleichung (10) zukommt.

Ohne uns allzusehr auf Details einzulassen, mag vorläufig im Nachstehenden ein ungefähres Bild entworfen werden, wie bei solchen Rechnungen vorgegangen wird.

Man kann zunächst von einer bestimmten Luftsättigung B ausgehen, und den Polbogen b als Bruchteil des vorläufig noch unbekannten Armaturumfanges in die Rechnung einsetzen:

$$b = \beta \frac{D\pi}{2p}.$$

Der Drahtdurchmesser d ist als Abhängige von der bereits zum voraus bekannten Stromstärke J und der zulässigen Belastung i pro mm² ebenfalls gegeben. Ferner bestimmt man für die angenommene Armaturkonstruktion (glatte, Loch- oder Zackenarmatur) die Zahl der Windungen, welche pro cm Armaturumfang placiert werden können, so dass

$$N = k_1 \,.\, D\pi$$

ist, schliesslich sei die Armaturlänge $l = \lambda D$ gesetzt.

Die Gleichung (10) kann also folgendermassen geschrieben werden:

$$E = n\left(B.\frac{\beta D \pi}{2p}.\lambda D\right) k_1 D\pi . \frac{1}{60.10^8} . \frac{p}{p_1} = \frac{n B . \beta \lambda k_1 . \pi^2 . D^3}{2.60.10^8.p_1}$$

woraus

$$D = \sqrt[3]{\frac{E.p_1 2.60.10^8}{n B . \beta \lambda . k_1 . \pi^2}}.$$

(Für den praktischen Gebrauch bequemere Formeln finden sich in den späteren Kapiteln, siehe Gleichungen 48—52 und 56.)

In dieser Gleichung sind E und n zum voraus bekannte Grössen, p_1, B, $\beta \lambda$ und k_1 Faktoren, welche nach Gutfinden gewählt werden können; die Berechnung von D ist also sehr einfach.

Sind die Dimensionen der Armatur einmal bekannt, so kann an die Berechnung der Magnete geschritten werden, die so auszuführen ist, dass pro Pol die vorausgesetzte Linienzahl Φ erreicht wird. Die Berechnung von Gleichstrommaschinen zerfällt also in folgende zeitlich aufeinander folgende Operationen:

1. Bestimmung der Armatur mit Zugrundelegung einer bestimmten Φ.
2. Bestimmung der Magnete zur Erreichung dieser Induktion.

C. Masseinheiten, Widerstandsberechnungen.

Für diejenigen Leser, welche weniger vertraut mit den Grundgesetzen der Elektrizitätslehre sind — eine allgemeine Kenntnis der wichtigsten Gesetze muss übrigens als selbstverständlich vorausgesetzt werden — mögen die speziell zum Verständnis dieses Buches erforderlichen Regeln noch einmal kurz resümiert werden:

Misst man z. B. Stromstärke und Spannung in sogenannten absoluten Einheiten (cm, g, sek. oder Cgs.-Einheiten), so erhält man die Arbeit als Produkt der beiden in *Ergs*. Für praktische Berech-

nungen eignen sich jedoch diese absoluten Masse ihrer überaus kleinen Einheiten wegen nicht, man führte daher sogenannte praktische Einheiten ein:

Tabelle der praktischen Einheiten.

Praktische Einheit der Stromstärke	1 Ampère (A.) =	10^{-1} absolute Einheiten
Praktische Einheit der Spannung	1 Volt (V.) =	10^{8} „ „
Praktische Einheit des Widerstandes . . .	1 Ohm (Ω.)[1] =	10^{9} „ „
Praktische Einheit des elektrischen Effektes	1 Volt-Ampère oder Watt (V. A.) =	10^{7} „ „ (Ergs)
Praktische Einheit des mechanischen Effektes	1 Sek. kgm =	$9{,}81 . 10^{7}$ „ „
	1 PS =	$736 . 10^{7}$ „ „

Aus der vorstehenden Tabelle folgt:

$$1 \; Watt = \frac{1}{736} \; PS \text{ oder } 736 \; Watts = 1 \; PS.$$

(Die englische Pferdestärke $HP = 746$ *Watts.*)

Unter der absoluten Einheit der Kraft, dem *Dyn*, wird jene Kraft verstanden, welche der Masse eines Grammes die Beschleunigung eines cm in der Sekunde erteilt:

1 g ist daher gleich 981 *Dyn*,
1 kg = 981 000 *Dyn*.

Unter Berücksichtigung, dass die praktische Einheit der Stromstärke zehnmal grösser als die absolute ist, erhalten wir somit die Zugkraft in kg ausgedrückt:

$$(14) \qquad Z = \frac{B\,l\,.\,J}{9{,}81\,.\,10^{6}},$$

wenn J in Ampère gemessen wird.

Es soll beispielsweise die Zugkraft in einem einzelnen Drahte einer Armatur ausgerechnet werden, wenn derselbe sich in einem Magnetfelde von 6000 Linien pro cm^2 bewegt. Ferner sei der Strom, welcher durch den Draht fliesst, 100 Ampère und die Armaturlänge 50 cm.

---

[1]) Für Widerstandsberechnungen von Isolationen ist selbst diese Einheit zu klein. Man rechnet in solchen Fällen mit sogen. Megohm $= 10^{6}\,\Omega = 10^{15}$ absoluten Einheiten.

Gleichung 14 ergiebt hierfür:

$$\text{Zugkraft } Z = \frac{6000 . 50 . 100}{9{,}81 . 10^6} = 3{,}06 \text{ kg.}$$

Wir sehen hieraus, dass, je dicker der Draht bezw. je grösser die Stromstärke in demselben ist, um so grösseres Gewicht auf eine gute Befestigung desselben gegen Verschiebung gelegt werden muss.

Der Widerstand eines Leiters wird nach der Formel berechnet:

(15) $$R = \frac{\mathfrak{L}}{s} \cdot \varrho.$$

$\mathfrak{L}$ Länge des Leiters in m,
s Querschnitt desselben in mm², und
ϱ Widerstands-Koeffizient $= \frac{1}{\text{spezif. Leitungsfähigkeit}}$.

Die Tabelle I (am Schlusse des Buches) enthält die Widerstands-Koeffizienten für verschiedene Leiter bei 0° Celsius. Der Widerstand nimmt mit der Erwärmung zu und zwar nicht im gleichen Grade bei den verschiedenen Materialien. Kohlen bilden hiervon eine Ausnahme.

Aus dem Widerstands-Koeffizienten bei 0° lässt sich derselbe bei t^0 ableiten:

(16) $$\varrho^t = \varrho^0 (1 + \sigma t)$$

(siehe Tabelle I am Schlusse des Buches).

Die Widerstandszunahme bei Erwärmung ist manchmal ziemlich gross, sodass man nicht unterlassen darf, dieselbe insbesondere bei Berechnung von Nebenschlusswicklungen, in Rechnung zu ziehen. Es mag an einem Beispiele gezeigt werden:

Nehmen wir an, die Magnetspule erwärme sich auf 60°, was ganz normal ist, so ist

$$\varrho^t = \varrho^0 (1 + 60 . 0{,}0037) = 1{,}22\, \varrho^0,$$

d. h. der Widerstand der Magnetspule steigt um 22 %, oder, was gleichbedeutend ist, der Erregerstrom sinkt um den gleichen Betrag.

der **Hintereinanderschaltung** einer Anzahl von Wider-
r_2 u. s. w. ist der totale Widerstand gleich der Summe
Widerstände, d. h.:

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots \text{ etc.}$$

Bei der **Nebeneinander-** oder **Parallelschaltung** ist die totale Leitungsfähigkeit des Systems, d. h. der reziproke Wert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Leitungsfähigkeiten der einzelnen Zweige:

(18) $$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \ldots \text{ etc.}$$

Sind 4 Zweige vorhanden, so ist dann

$$R = \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4}{r_2 \cdot r_3 \cdot r_4 + r_1 \cdot r_3 \cdot r_4 + r_1 \cdot r_2 \cdot r_4 + r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}.$$

II. Berechnung der Armatur.

A. Wicklungsarten.

Die Zahl der theoretisch ausführbaren Wicklungen ist eine überaus grosse und das Studium derselben bietet in mancher Beziehung viel interessantes. Mit Rücksicht auf den Zweck dieses Buches werden wir uns hingegen nur auf die relativ geringe Zahl derjenigen Wicklungen beschränken, welche in der Praxis immer wiederkehren. Für eingehendere Studien verweisen wir den Leser auf das vorzügliche Spezialwerk von Prof. E. Arnold, „Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen".

1. Ringwicklungen.

Figur 12 stellt einen sogenannten Gramme-Pacinotti-Ring dar. Alle Drähte am Umfange der Armatur, welche oberhalb der neutralen Zone *n n* liegen, werden, wie ersichtlich, von einem gleichgerichteten Strome durchflossen; desgleichen die unterhalb der neutralen Zone liegenden Drähte, in letzteren ist jedoch die Stromrichtung umgekehrt. Würden auch Kraftlinien in den Luftraum im Innern der Armatur dringen, so entstände dadurch in den daselbst befindlichen Drähten eine E.M.K., entgegengesetzt derjenigen in den äussern Drähten, die Gesamtwirkung würde also zum mindesten dadurch herabgedrückt. Da indessen der Luftraum den Kraftlinien einen bedeutend grössern Widerstand entgegensetzt als das Armatureisen, so kann die schädliche Wirkung beinahe vernachlässigt werden.

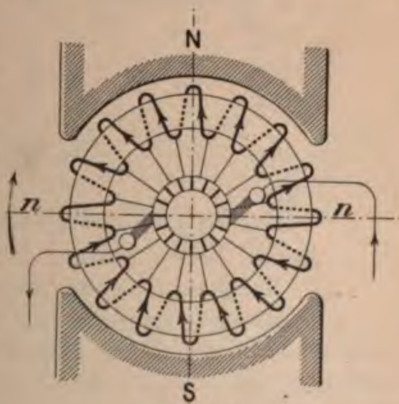


Fig. 12.

Um einen Vergleich der verschiedenen Wicklungsarten zu ermöglichen, soll in Nachstehendem mit

e die Spannung bezeichnet werden, welche in einem Leiterelement (Spule zwischen zwei Kommutatorsegmeten) erzeugt wird. Wir machen hierbei der Einfachheit halber die Voraussetzung, dass sämtliche Spulen am Umfange der Armatur, also auch diejenigen ausserhalb der Polen, gleichmässig induziert werden, wodurch wir einen kleinen Fehler bei der Abstimmung von e_1 und e_2 machen;

e_1 gleich max. Spannungsdifferenz zwischen 2 aufeinanderfolgenden Armaturspulen;

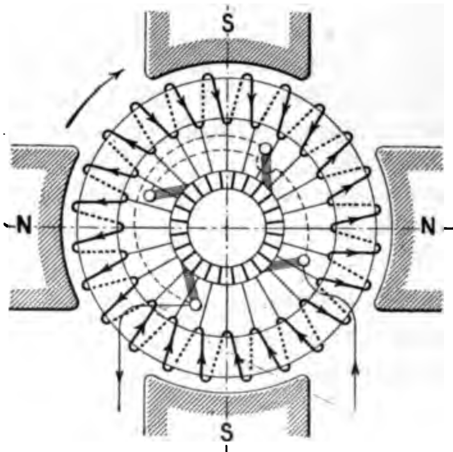


Fig. 13.

e_2 gleich max. Spannungsdifferenz zwischen 2 aufeinanderfolgenden Kommutatorsegmenten;

N_1 gleich Anzahl Spulen bei Grammeringen;

N_2 Anzahl Lamellen des Kommutators;

$2p$ Anzahl der Pole.

$2p_1$ Anzahl parallel geschalteter Stromkreise, gewöhnlich auch gleichbedeutend mit der Zahl Bürstenstifte; für eine zweipolige Maschine ist $p_1 = 1$, für eine vierpolige Maschine mit 2 parallelen Stromkreisen = 1, mit 4 Stromverzweigungen = 2 u. s. w.

Bei der Beurteilung von Wicklungen sind folgende Punkte von Bedeutung:

Maximale Spannung zwischen den nebeneinander liegenden Spulen oder Drähten;

Maximale Spannung zwischen 2 Kommutatorsegmenten;

Maximal mögliche Zahl von Kommutatorsegmenten;

Zahl der durch eine Bürste gleichzeitig kurz geschlossenen Drähte.

Für Fig. 12 ist

$$N_2 = N_1$$

$$e_1 = 0$$

$$e_2 = \frac{2\,E}{N_2} = \frac{2\,E}{N_1}.$$

Zahl der gleichzeitig kurzgeschlossenen Armaturspulen = 1.

Die Zahl der zwischen den Bürsten hintereinander geschalteten Spulen beträgt abwechslungsweise 7 und 8. Wären alle Spulen dem Einflusse der Pole ausgesetzt, so würde dadurch eine Variation von 12% in der Spannung entstehen. Da indessen die ausgeschalteten Spulen in der neutralen Zone liegen, wo die induzierte E.M.K. nahezu gleich Null ist, beträgt die Variation bedeutend weniger und kann schon bei ca. 20 Kommutatorlamellen ganz vernachlässigt werden.

Bei der mehrpoligen Ringarmatur (Fig. 13) sind so viele Stromäste als Pole vorhanden. Demzufolge ist

$$p_1 = p$$
$$N_2 = N_1$$
$$e_1 = 0$$
$$e_2 = \frac{2\,p_1\,E}{N_1} = \frac{2\,p_1\,E}{N_2}.$$

Die auf einen Armaturdraht entfallende Stromstärke ist gleich der Gesammtstromstärke dividiert durch $2\,p_1$.

Wicklungen mit mehr als 2 Bürsten werden auch als **Parallel-Wicklungen** bezeichnet, im Gegensatze zu den **Seriewicklungen**.

Öfters ist es erwünscht, bei mehrpoligen Ringwicklungen die Zahl der Bürsten zu vermindern, was nach **Mordey** dadurch geschehen kann, das man die einander gegenüberliegenden Kommutatorsegmente miteinander verbindet (s. Fig. 14).

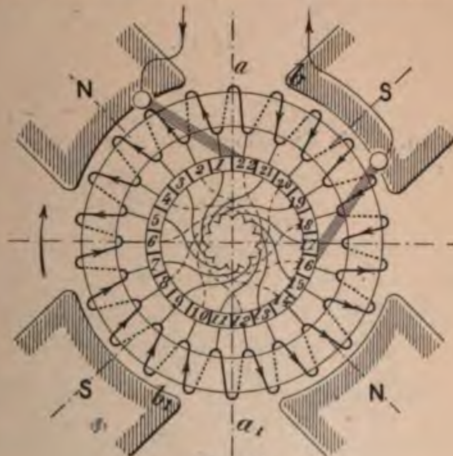


Fig. 14.

Selbstverständlich muss in einem solchen Falle der Kommutator doppelte Breite erhalten. Bedingung ist auch, dass N_2 eine gerade Zahl sei.

Diese Anordnung kann auch auf Maschinen mit mehr als 2 Bürsten angewandt werden. Sie besitzt den Vorteil, dass kleine Spannungsdifferenzen der einzelnen Zweige ausgeglichen werden, ferner gestattet sie, die Bürsten eines Stiftes während dem Betriebe abzuheben.

Der Winkel zwischen zwei Bürsten ist stets

$$\alpha = \frac{360}{2\,p}$$

und die Bürsten kommen zwischen zwei Pole zu liegen.

Eine Untersuchung der Fig. 14 zeigt, dass auf diese Weise stets 2 Spulen a und a_1, b und b_1 parallel geschaltet sind.

Wir können also, ohne etwas an der Spannung der Maschine zu ändern, abwechslungsweise die eine dieser Spulen unterdrücken, und dafür den Draht der übrigbleibenden doppelt so stark machen. Auf diese Weise gelangen wir zu der äusserst interessanten Wicklung Fig. 15, welche sich in hohem Grade für hochgespannte Maschinen eignet. Nach diesem Schema sind z. B. sämtliche Tramwaymotoren der Maschinenfabrik Oerlikon seit 1892 ausgeführt.

Fig. 15.

Eine besondere Eigentümlichkeit derselben besteht darin, dass

$$N_2 = 2N_1$$

wird. Um die Wicklung ausführen zu können, muss $\frac{N_2}{2} = N_1$ eine ungerade Zahl sein.

$$e_1 = \frac{2E}{N_1}$$

$$e_2 = \frac{2pE}{N_2} = e_1 .$$

Das gleiche Schema lässt sich auch für 6 polige Maschinen ausführen, doch werden hier die Verbindungen im Kommutator etwas umständlich.

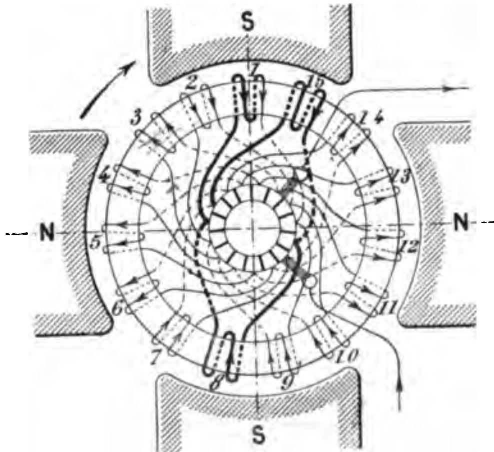


Fig. 16.

Fig. 16 stellt eine zweite Serienringwicklung von Perry (1882) für eine 4 polige Maschine dar, die auch auf eine beliebige Polzahl anwendbar ist.

Anmerkung. Wir machen sowohl hier wie auch später keinen Unterschied zwischen den Wicklungsarten, welche sich nur durch die Lage der Kommutator-

lamellen zu den Spulen, mit denen sie verbunden sind, auszeichnen. Stellen wir uns z. B. in Fig. 16 die Verbindungen nach dem Kommutator aus flexiblen Kabeln bestehend vor, so können wir den Kommutator ohne weiteres um 45° nach vorwärts oder rückwärts gegenüber der Armatur verdrehen; die Bürsten kommen in diesem Falle direkt unter die Pole zu liegen.

Hiervon mag dann Anwendung gemacht werden, wenn die natürliche Bürstenstellung wegen Unzugänglichkeit der Bürsten unbequem würde.

Bei den Wicklungen nach dem Schema Fig. 16 ist der Wicklungsschritt[1] y für eine beliebige Zahl von Polen

$$y = \frac{N_1 \pm 1}{p}.$$

Für p gerade muss daher N_1 ungerade sein, für p_1 ungerade sind beide Fälle möglich.

$$N_2 = N_1$$

$$e_1 = \frac{2\,E}{N_1}(p + 1)$$

$$e_2 = \frac{E}{N_2}.2p = \frac{E.2p}{N_1}$$

$$p_1 = 1$$

$$\alpha = \frac{360}{2p}.$$

Die Bürsten kommen bei Fig. 16 zwischen die Pole zu liegen.

Allgemeine Wicklungsformeln.

Die allgemeine Wicklungsformel für derartige Wicklungen kann durch folgende Überlegung gefunden werden[2]: Da sämtliche Spulen gleich gewickelt sind, dürfen infolge dessen nur Spulen, welche unter gleichnamigen Polen liegen, aneinandergeschaltet werden. Nun ist die Distanz zweier gleichnamiger Pole in Leiterelementen ausgedrückt $= \frac{N_1}{p}$.

Der Abstand, um welchen die aufeinander folgenden Spulen gegenüber den Polaxen verschoben werden, ist ferner gleich

$$\pm \frac{N_1}{p} \mp y$$

---

[1]) Mit Wicklungsschritt (engl. spacing, franz. pas) wird die Distanz zweier miteinander verbundener Elemente bezeichnet, d. h. die Anzahl Teilstrecken (Spulen, Drähte), um welche dieselben auseinanderliegen. Bei dem Schema Fig. 16 ist z. B. $y = 7$.

[2]) Siehe Aufsatz des Elektr. Instituts der k. k. Hochschule Wien „Über geschlossene Ankerwicklungen für Gleichstrom-Dynamomaschinen, Zeitschrift für Elektrotechnik, Heft 2, 1898.

je nachdem

$$y <> \frac{N_1}{p}$$

ist. Bei einer Serienschaltung beträgt aber die Zahl hintereinander geschalteter Spulen $\frac{N_1}{2}$ Elemente; nachdem also der Wicklungsschritt $\frac{N_1}{2}$ mal ausgeführt wird, muss die $\left(\frac{N_1}{2}+1\right)^{te}$ Spule bereits unter einem Pole entgegengesetzter Polarität zu liegen kommen, d. h. gegenüber den ersten um den Abstand $\frac{N_1}{2p}$ Leiterelemente verschoben sein, oder algebraisch ausgedrückt: Es ist

$$\frac{N_1}{2}\left(\pm \frac{N_1}{p} \mp y\right) = \frac{N_1}{2p}$$

oder

(19) $$\frac{1}{p}\left(N_1 \mp 1\right) = y \quad .$$

Wir setzen hierbei voraus, dass die aneinander gereihten Spulen jedem nächstfolgenden gleichnamigen Pole angehören. Es steht uns aber auch vollständig frei, Spulen des gleichen Poles mit einander zu verbinden oder, was allerdings mit Rücksicht auf die langen Verbindungen unzweckmässig ist, jeden zweiten Pol gleicher Polarität zu überspringen.

Der Betrag, um welchen die Wicklung gegenüber den Polaxen vorrückt, ist daher allgemein =

$$\pm \varepsilon \frac{N}{p} \mp y$$

und zwar ist

für Verbindungen von Spulen des gleichen Poles $\varepsilon = 0$
" " " " des nächstfolgenden gleichen Poles $\varepsilon = 1$
" " " " des zweiten Poles gleicher Polarität $\varepsilon = 2$ etc.

Wir können ferner die obige Formel noch allgemeiner behandeln, indem wir die Zahl paralleler Stromkreise statt 2 allgemein gleich $\frac{1}{2p_1}$ setzen.

Die obige Formel nimmt dann folgende Gestalt an

$$\frac{N_1}{2p_1}\left(\pm \varepsilon \frac{N_1}{p} \mp y\right) = \frac{N_1}{2p}$$

oder

(20) $$\frac{1}{p}\left(\varepsilon N_1 \mp p_1\right) = y.$$

Diese allgemeine Formel schliesst, wie wir sehen, auch den Fall eines gewöhnlichen Grammeringes in sich, wobei $\varepsilon = 0$ ist.

Damit die nämliche Spule nicht zweimal berührt wird und eine geometrisch geschlossene Figur entsteht, welche alle Teiler enthält, besteht die Bedingung, dass N_1 und y einen Leiter haben müsse, welcher den beiden nicht gemeinsam ist.

Auf die Serienwicklung Fig. 16 angewendet wären beispielsweise $p = 2$, $\varepsilon = 1$, $N_1 = 15$, $p_1 = 1$, somit

$$y = \frac{1}{2}\left(15 - 1\right) = 7.$$

Aus Gleichung 20 lassen sich unmittelbar eine Reihe von höchst interessanten Parallelwicklungen ableiten, welche zuerst von Prof. E. Arnold vorgeschlagen wurden.

a) Maschinen mit mehr parallelen Stromkreisen als Polen.

Wir betrachten hier nur den Fall einer zweipoligen Maschine mit 4 Stromkreisen, da mehrpolige Maschinen dieser Art vorteilhafter mit Trommelwicklung ausgeführt werden.

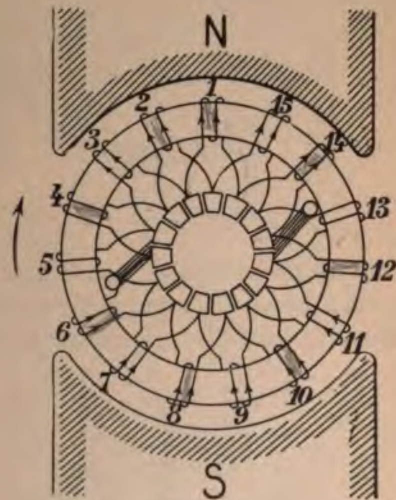


Fig. 17.

Es sei

$p = 1$, $p_1 = 2$, $\varepsilon = 0$, $N_1 = 15$,

so wird

$$y = \frac{1}{p}\left(\varepsilon N_1 \mp p_1\right) = \frac{1}{1}\left(0 \mp 2\right) = \mp 2$$

und wir gelangen zu der Fig. 17.

Von dieser Wicklung mag Gebrauch gemacht werden, wenn die Stromstärke so gross ist, dass sich bei der gewöhnlichen Schaltung unverhältnismässig grosse Drahtquerschnitte ergeben, oder falls die Anzahl Kommutatorsegmente zu klein ausfällt.

Zu bemerken ist, dass die Bürsten stets mindestens 2 Kommutatorlamellen berühren müssen, da sonst für gewisse Lagen ein Teil der Wicklung ausgeschaltet wäre.

Ein spezieller Fall der beschriebenen Wicklung ist der, wo y und N_1 einen gemeinschaftlichen Teiler haben. Dies trifft z. B. zu im Schema Fig. 18, wo $y = 2$ und $N_1 = 16$ den Teiler 2 gemeinsam haben. Es ent-

stehen daher 2 getrennte Wicklungen. Auch hier müssen die Bürsten aus den bereits erklärten Gründen mindestens 2 Kommutatorsegmente überdecken.

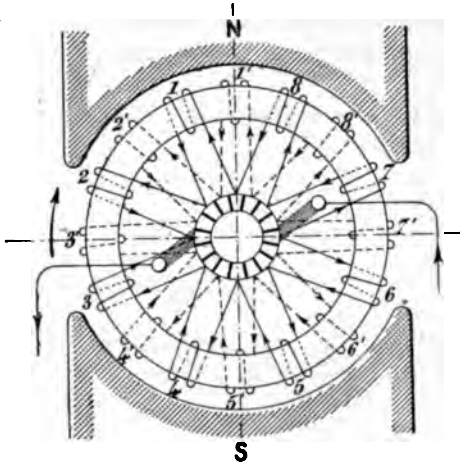


Fig. 18.

b) **Mehrpolige Maschinen mit eben soviel Bürsten als parallelen Stromkreisen.**

Nimmt man $N_1 = 16$, $p = p_1 = 2$ und $\varepsilon = 1$, so gelangt man zum Wicklungsschema Fig. 19. Der Wicklungsschritt ist

$$y = \frac{1}{p}\left(\varepsilon N_1 - p_1\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(1 . 16 - 2\right) = 7$$

Diese Wicklung besitzt die wertvolle Eigenschaft, dass die zwischen 2 Polen eingeschalteten Spulen sämtlichen Polen angehören. Auf diese Weise werden event. Spannungsdifferenzen der einzelnen Zweige infolge kleiner Konstruktionsfehler (Excentrisches Ausbohren, Gussfehler etc.) ausgeglichen. Diese Wicklung mag daher mit Vorteil bei grossen Maschinen mit Parallelschaltung verwendet werden, wo die gewöhnliche Grammewicklung etwas zu riskiert wäre. Besitzen nämlich die einzelnen Stromkreise nicht genau die gleiche Spannung, so entstehen lokale Ströme, welche im Innern der Armatur verlaufen und neben einer starken Erwärmung eine entsprechende Reduktion des Nutzeffektes zur Folge haben.

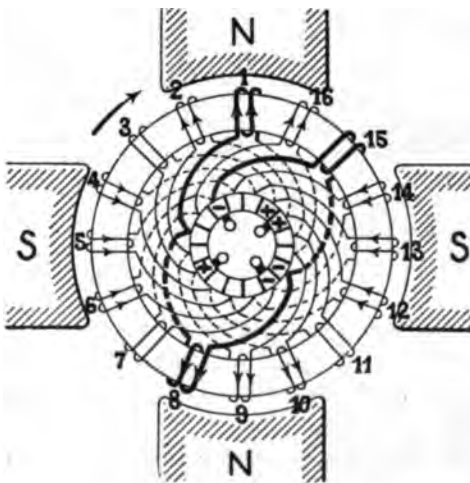


Fig. 19.

Wir machen bei dieser Wicklung noch einige interessante Beobachtungen: Der Kurzschluss einer Spule wird nicht etwa durch gleichzeitige Berührung zweier benachbarter Kommutatorsegmente durch die Bürsten gebildet, sondern

entsteht zwischen 2 gleichnamigen Bürsten. Da ferner die Drähte 3 und 15 nicht induziert sind, dürfen wir ohne weiteres die Bürten $\overline{3,10}$ und $\overline{6,15}$ nach $\overline{3,12}$ und $\overline{15,8}$ bringen. Man kann also bei dieser Wicklung im Notfalle auch mit 2 Bürsten von doppelter Dicke auskommen, sofern dadurch immer mindestens 2 Lamellen überdeckt werden.

Fig. 20 zeigt schliesslich die gleiche Wicklung für 6 Pole. Die einzelnen Daten sind wie folgt:

$N_1 = 24$, $p = p_1 = 3$, $\varepsilon = 1$, nach Gleichung (20) ist daher

$$y = \frac{1}{p}\left(\varepsilon N_1 - p_1\right) = \frac{1}{3}\left(1 . 24 - 3\right) = 7.$$

2. Trommelwicklungen.

Die ersten Ausführungen von Trommelwicklungen rühren von v. Hefner-Alteneck, Ingenieur der Firma Siemens & Halske, her.

Die Trommelwicklungen unterscheiden sich von den Ringwicklungen dadurch, dass alle Drähte am Umfang der Armatur angebracht sind. Damit sich also die elektromotorischen Kräfte der einzelnen Drähte summieren können, dürfen sich nie zwei unter der Einwirkung des nämlichen Poles befindliche Drähte aufeinander folgen, sondern es müssen stets zwei Drähte mit einander verbunden werden, welche verschiedenen Polen angehören. Dabei kann die Wicklung eine fortschreitende sogen. Wellenwicklung (engl. Wave-Winding) sein, wenn man nach einander sämtliche Pole durchläuft, oder eine Schleifenwicklung (engl. Lap-Winding), indem man vom zweiten Pole zunächst wieder nach dem ersten zurückkehrt nnd nur je um die Differenz der Wicklungsschritte vorwärts schreitet.

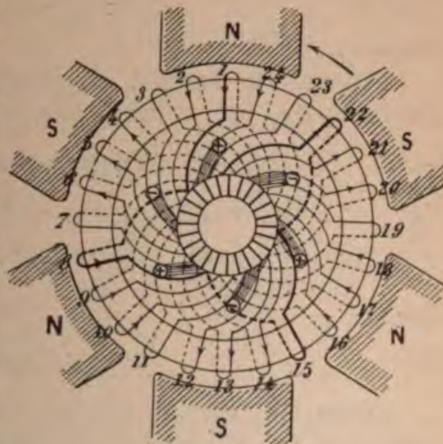


Fig. 20.

Bei Schleifenwicklung wechselt der Wicklungsschritt ab, bei Wellenwicklung kann er je nach der Zahl der Elemente event. konstant sein, was für die praktische Ausführung gewisse Vorteile gewährt.

Als allgemeine Regel mag jetzt schon bemerkt werden, dass die Wicklungsschritte y und y_1 stets ungerade Zahlen sein müssen. Eine Ausnahme hiervon bilden nur diejenigen Wicklungen, welche in zwei

Lagen ausgeführt werden, wobei man den Wicklungsschritt mit Bezug auf die Elemente einer Lage angiebt.

Die Bezeichnung Wellen- oder Schleifenwicklung wird sofort klar, wenn man die Armaturoberfläche in einer Ebene ausgebreitet darstellt (Fig. 26a und 28a).

Allgemeine Formeln.

a) Ableitung der allgemeinen Formel für Wellenwicklungen. Da stets Drähte ungleichnamiger Pole aufeinander folgen müssen, wobei die Wicklungsschritte event. verschieden sein können, werden wir, um das Vorrücken der Wicklung zu bestimmen, das arithmetische Mittel aus den beiden Schritten y und y_1 einsetzen.

Der Betrag, um welchen ein Leiter nach jedem Schritte gegenüber den Polaxen verschoben wird, ist daher gleich

$$\pm \frac{N_1}{2p} \mp \frac{y-y_1}{2}$$

Elemente.

Nehmen wir die Zahl der parallel geschalteten Stromkreise allgemein zu $2p_1$ an, so muss folglich der letzte Draht, nachdem der Schritt $\frac{N_1}{2p_1}$ mal ausgeführt wird, um den Abstand zweier Pole gegenüber der Polaxe verschoben sein, und es ist

$$\frac{N_1}{2p_1}\left(\pm \frac{N_1}{2p} \mp \frac{y+y_1}{2}\right) = \frac{N_1}{2p}$$

oder

(21) $$\frac{1}{p}(N_1 \mp 2p_1) = y + y_1.$$

Diese Wicklung eignet sich ebensowohl für Serieschaltung ($p_1 = 1$), als auch für Parallelschaltung, und zwar besitzt sie in letzterem Falle die bereits anlässlich den Ringwicklungen mit Parallelschaltung hervorgehobenen Vorteil, dass die zwischen zwei Bürsten eingeschalteten Drähte über den ganzen Armaturumfang verteilt sind.

b) Allgemeine Formel für Schleifenwicklung.

Bei Schleifenwicklung rückt der Draht mit jedem zweiten Schritt um die Grösse $y - y_1$ vor, folglich ist

$$\frac{N_1}{2p_1}\left(\frac{y-y_1}{2}\right) = \frac{N_1}{2p}$$

oder

(22) $$y - y_1 = 2\frac{p_1}{p}.$$

Damit jeder Draht nur einmal berührt wird, müssen aber y und y_1 ungerade Zahlen sein und ist ferner Bedingung, dass

$$y - y_1 = > 2$$

sei. Daraus folgt, dass

$$p_1 = > p$$

sein muss.

Die Schleifenwicklung eignet sich also nur für Parallelschaltung.

Anmerkung. Die obigen Formeln lassen sich übrigens noch allgemeiner ausdrücken durch Einführung der bereits bekannten Koefficienten ε, welcher hier angiebt, um wie viel Pole die Wicklung nach Vornahme des doppelten Wicklungsschrittes $(y \pm y_1)$ gegenüber der ursprünglichen Lage des Drahtes vorgerückt sei. Man schreibt dann allgemein:

$$\frac{1}{p}(\varepsilon N \mp 2 p_1) = y \pm y_1, \tag{23}$$

wobei für Schleifenwicklung

$\varepsilon = o$ und $y - y_1$

und für Wellenwicklung

$\varepsilon = 1$ und $y + y_1$

zu nehmen sind.

Der einzige Vorwurf, welcher diese Ausdrucksweise treffen kann, ist vielleicht der, dass damit jegliche Einsicht in das Wesen der Wicklung verloren geht.

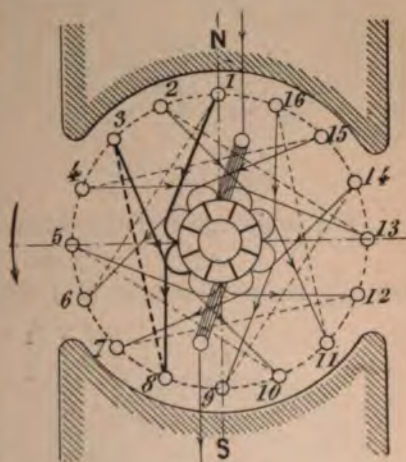


Fig. 21.

Wir schreiten nunmehr zur Beschreibung einiger häufig vorkommender Wicklungen.

Fig. 21—25 zeigen verschiedene Schema von zweipoligen Trommelwicklungen; Fig. 21 entspricht dem Typus der Schleifenwicklungen, Fig. 22—25 demjenigen der Wellenwicklungen. Bei der ersteren Anordnung müssen die beiden Wicklungsschritte y und y_1 mindestens gleich oder kleiner als der Polbogen b sein. Gegenüber den andern Wicklungen hat dieselbe den kleinen Vorteil, dass sich weniger Drähte kreuzen und die Drahtlänge etwas kürzer wird.

Bezüglich der Bürstenstellung ist zu bemerken, dass bei den Wicklungen 21—23 u. 25 die Bürsten in die Polaxe zu liegen kommen, während sie bei Fig. 24 in die neutrale Zone eingestellt werden müssen. Dieser Umstand ist öfters bei Motoren mit feststehenden Bürsten ausschlaggebend. Als Nachteil von der Anordnung Fig. 24

mag angeführt werden, dass die Wicklung wegen den Verbindungsdrähten mit dem Kommutator etwas mehr Platz beansprucht.

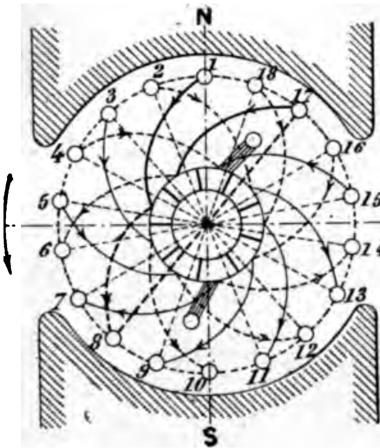


Fig. 22.

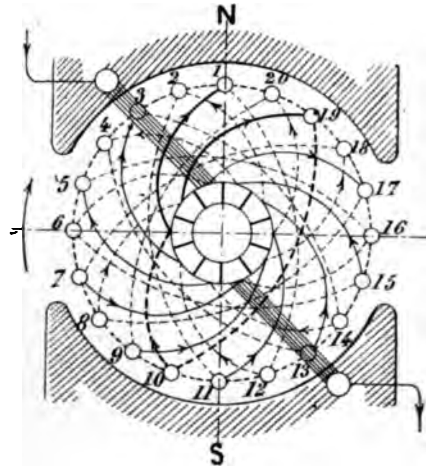


Fig. 23.

Für zweipolige Wellenwicklungen und zwei parallele Stromkreise ist

$$p = 1, \; p_1 = 1.$$

Die allgemeine Gleichung (21) geht daher über in

$$y + y_1 = N_1 \pm 2$$

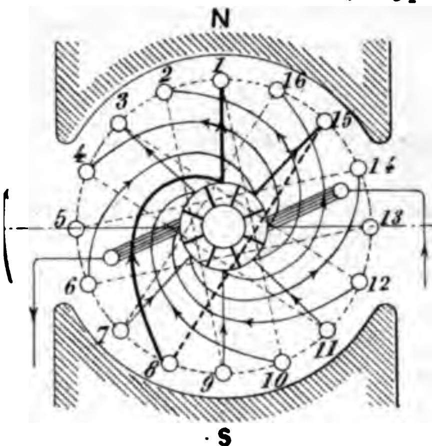


Fig. 24.

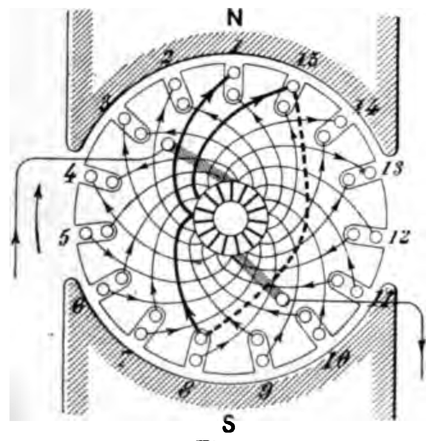


Fig. 25.

und es ist

$$N_2 = \frac{N_1}{2}$$

$$e_1 = E\left(\frac{N-2}{N}\right)$$

$$e_2 = \frac{2\,E}{N_2} \cdot$$

Zahl der kurzgeschlossenen Elemente = 2.

Bei Fig. 22 ist $y = 7$ und $y_1 = 9$, für Fig. 23 ist $y = y_1 = 9$.

Nutenarmaturen werden häufig in zwei Lagen ausgeführt (Fig. 25), im übrigen könnten die gleichen Regeln benutzt werden, wenn wir uns je einen Draht der zweiten Lage zwischen zwei der ersten Lage heruntergeklappt denken.

Noch besser jedoch ist es, wenn wir den Wicklungsschritt nur auf die erste Lage beziehen. In diesem Falle fällt die Beschränkung, dass y und y_1 ungerade Zahlen sein müssen, weg, und wir haben einfach die Regel zu beobachten

$$\frac{1}{p}(N_1 \mp p_1) = y + y_1,$$

worin N_1 für die Nutenzahl steht.

In Fig. 25 ist beispielsweise $y = y_1$, folglich

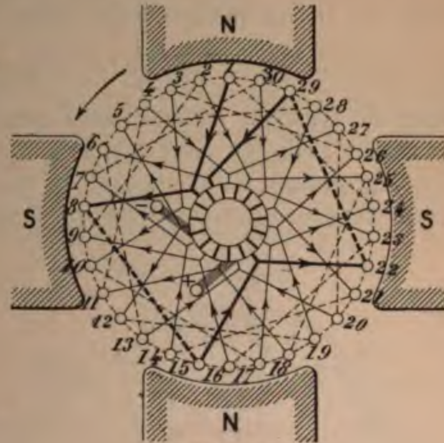


Fig. 26.

$$y = \frac{1}{2p}(N_1 \mp p_1) = \frac{1}{2.1}(15 - 1) = 7.$$

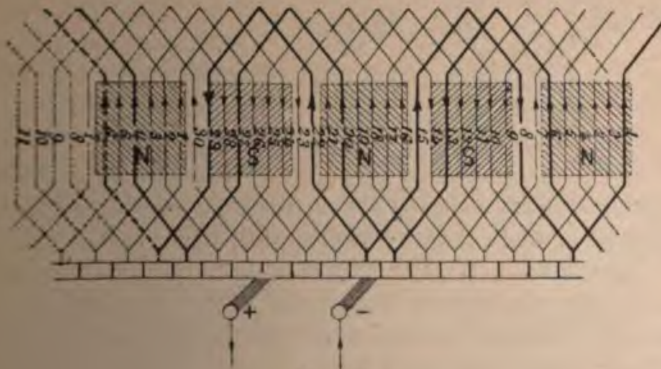


Fig. 26a.

Die beiden Lagen müssen sehr gut von einander isoliert werden, da die Spannung zwischen denselben

$$e_1 = E\left(\frac{N_1 - 2}{N_1}\right) \quad \text{ist.}$$

Mehrpolige Maschinen mit Serieschaltung folgen immer dem Schema der Wellenwicklung. Die allgemeine Wicklungs-Formel lautet daher, indem wir $p_1 = 1$ setzen

$$\frac{1}{p}(N \mp 2) = y + y_1,$$

wenn die Drähte nebeneinander liegen und

$$\frac{1}{p}(N_1 \mp 1) = y + y_1,$$

wenn die Wicklung in zwei Lagen ausgeführt wird und der Wicklungsschritt in Einheiten einer einzelnen Lage ausgedrückt wird.

Im ersten Falle müssen y und y_1 ungerade sein, im letzteren können sie nach Belieben gewählt werden.

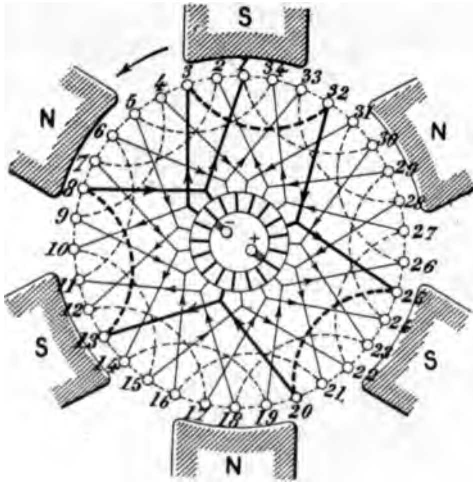


Fig. 27.

Solche Seriewicklungen sind in Fig. 26 für eine vierpolige und in Fig. 27 für eine sechspolige Maschine dargestellt. Wickelt man das Schema Fig. 26 in eine Ebene ab, so entsteht die Fig. 26a. Die Abwicklung in eine Ebene erleichtert ganz besonders die Einteilung, im übrigen mag gleich beigefügt werden, dass für eine Serieschaltung ein Wicklungsschema ganz überflüssig ist, sofern der Schritt richtig ausgerechnet wird. Die schematische Aufzeichnung der Wicklung empfiehlt sich dagegen zur Kontrolle bei Parallelwicklungen mit Wellenlinien, wenn man vermeiden will, dass event. mehrere geometrisch geschlossene Wicklungen entstehen. In Wirklichkeit hat dies absolut keine Bedeutung, Hauptsache bleibt nur, dass die Bürsten genügend dick gehalten werden, sodass nie ein Teil der Wicklung für gewisse Stellungen ausgeschaltet wird.

Besondere Aufmerksamkeit ist der Isolation des Kommutators und der Wicklung zu schenken, es ist nämlich:

$$e_1 = E - p\frac{2E}{N_1} = E\left(1 - \frac{2p}{N_1}\right)$$

$$e_2 = \frac{2pE}{N_2}$$

Der Winkel, um welchen die Bürsten auseinanderstehen, beträgt allgemein $\frac{360}{2p}$ Grade. Diese Regel ist jedoch nicht Vorschrift. Wir dürfen nämlich die Stromabnahmestelle ohne weiteres um den Betrag $y+y_1$ oder um $\frac{360}{p}$ Grade nach links oder rechts verlegen, solange

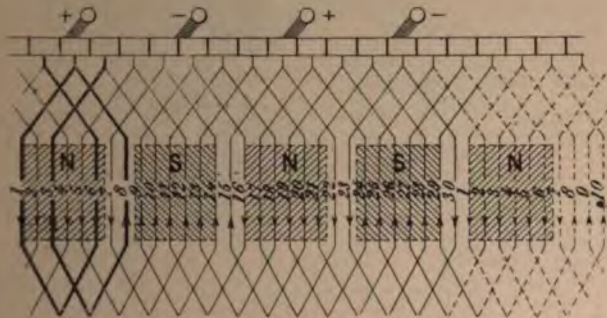


Fig. 28.

die dadurch unwirksam gemachten Drähte keine wesentliche Induktion besitzen. Infolgedessen können z. B. bei einer sechspoligen Maschine die Bürsten unter $\frac{360}{2.3} = 60^0$ oder um $60 + \frac{360}{3} = 180^0$ auseinander stehen, desgleichen hat man bei einer achtpoligen Maschine die Wahl zwischen 45^0 und 135^0.

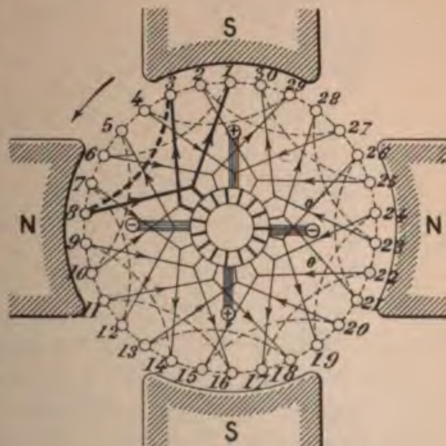


Fig. 28a.

Hiervon mag Anwendung gemacht werden, wenn die natürliche Bürstenlage Schwierigkeiten bei der Konstruktion des Magnetgehäuses bieten sollte, wie z. B. bei Trammotoren.

Wir kommen nun zu den **mehrpoligen Wicklungen mit Parallelschaltung.**

Der einfachste Fall ist der, wo $2p_1 = 2p$ gleich der Anzahl Bürsten ist, und **Schleifenwicklung** angewendet wird. Ein Beispiel dieser Art zeigen die Fig. 28 und 28a für eine vierpolige Maschine; hier ist

$$y = 7, \; y_1 = 5.$$

Beispiele von Parallelwicklungen mit Wellenlinien geben die Fig. 29—32, und zwar ist

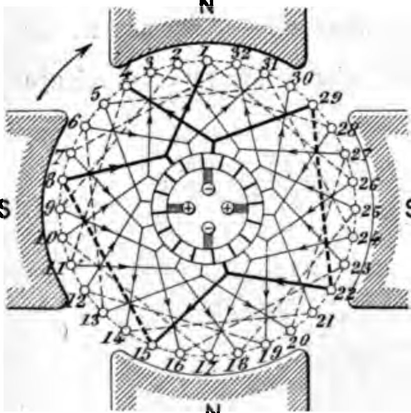


Fig. 29.

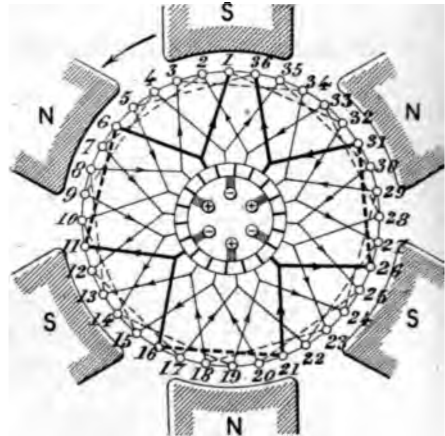


Fig. 30.

bei Fig. 29 $p = 2, p_1 = 2$, Bürstenzahl = 4 (Wicklung von Prof. Arnold)
„ „ 30 $p = 3, p_1 = 3$, „ = 6 „ „ „ „
„ „ 31 $p = 3, p_1 = 4$, „ = 6 „ „ „ „
„ „ 32 $p = 4, p_1 = 2$, „ = 4 „ „ „ „

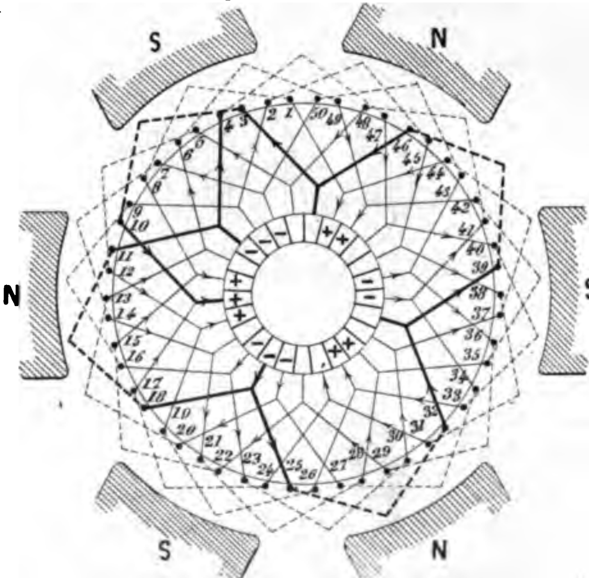


Fig. 31.

Die Wicklungsformel ergiebt sich unmittelbar aus der allgemeinen Gleichung, indem wir abwechslungsweise die Werte von p und p_1 darin einsetzen.

Die Bürstenzahl muss, wie wir bei den Ringwicklungen gesehen haben, nicht notwendigerweise gleich der Anzahl parallel geschalteter Stromkreise sein, sondern darf event. auch kleiner genommen werden, unter der Bedingung, dass die Bürstendicke proportionell erhöht wird.

Diese häufig unter dem Namen **„Serieparallelwicklungen"** bezeichneten Ausführungsarten sind sehr bequem, da sie einen sehr grossen Spielraum in der Wahl der Leitungsquerschnitte gewähren. So kann z. B. der Fall eintreten, dass für eine Serieschaltung der Leitungsquerschnitt viel zu gross ausfällt, während sich bei reiner Parallelschaltung ein zu kleiner Querschnitt ergeben würde. Durch geeignete Annahme von p_1 lässt sich daher der Querschnitt ganz den Bedürfnissen anpassen.



Fig. 32.

Handelt es sich um Maschinen mit bedeutenden Stromstärken, und erlauben es die Verhältnisse, die Zahl der Kommutatorsegmente zu verdoppeln, so ist die mehrfache Parallelschaltung durchaus angezeigt, da die Funkenbildung dadurch bedeutend vermindert werden kann, indem nur verhältnissmässig geringe Stromstärken kommutiert werden müssen.

Die Zahl der theoretisch möglichen Wicklungen ist damit lange nicht erschöpft. Insbesondere lassen sich die Ringwicklungen noch bedeutend vermehren. So genügt es, die einzelnen Drähte der behandelten Trommelwicklungen zu vollständigen Windungen mit links und rechtem Gang zu ergänzen, um eine grosse Zahl neuer Wicklungen

zu erhalten. Auf Schleifenwicklung angewandt, gelangt man auf diese Weise zu der früher gelegentlich benutzten Wicklung von Wodicka, welche allerdings nicht zu empfehlen ist, da sie ausser den bereits gerügten Nachteilen des Grammeringes für mehrpolige Maschinen noch den Übelstand unnötiger Komplikation aufweist.

Wichtiger dagegen sind die Wellenwicklungen, denn, wie leicht begreiflich ist, beanspruchen die Verbindungen nur halb so viel Platz als bei dem Schema Fig. 16, 19 und 20.

Ein Beispiel dieser Art zeigt Fig. 33 für

$$N_1 = 18,\ p = 2,\ p_1 = 1.$$

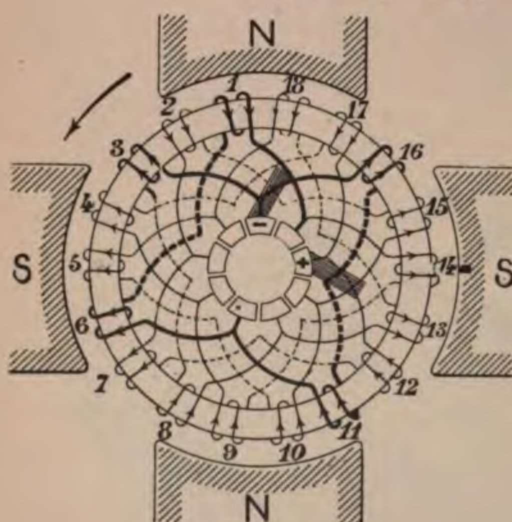


Fig. 33.

Nach der allgemeinen Gleichung für Trommelwicklungen wäre

$$\frac{1}{p}(N_1 \pm 2 p_1) = y + y_1$$

oder

$$\frac{1}{2}(18 + 2 . 1)$$

$$= y + y_1 = 10$$

$$y = y_1 = 5.$$

Die punktierten Verbindungen sind auf der hintern Seite der Armatur gedacht.

Anmerkung. Statt die Wicklungen an den Stirnflächen der Armatur auszuführen, können dieselben auch als sogenannte Mantelwicklungen hergestellt werden; wir brauchen uns die Wicklungen Fig. 26a und 28 nur um eine Armatur gelegt denken. Man erreicht dadurch eine bedeutend bessere Abkühlung, dagegen wird die Armaturlänge etwas vergrössert.

3. Scheibenwicklungen.

Von dieser Kategorie sind wohl zu unterscheiden die sogenannten Flachringarmaturen, bei welchen die Kraftlinien statt an der Peripherie von der Seite her eintreten, wobei die gegenüberliegenden Pole gleiche Polarität besitzen. In diesem Falle enthält die Armatur einen Eisenkern aus aufgewickeltem Eisenband oder -Draht, und die Wicklung unterscheidet sich in keiner Weise von den bereits behandelten Wicklungsarten. Eigentümlich sind nur jene Scheibenarmaturen, bei

welchen die gegenüberliegenden Pole ungleichnamig sind, weil sie keinen Eisenkern enthalten.

Hierunter gehört z. B. die Wicklung von Desrozier. Derselben liegt das Schema Fig. 34 a (ursprünglich von Sperry angegeben) zu Grunde, das wir bereits in den Seriewicklungen Fig. 26 und 27 kennen gelernt haben. Das Charakteristische der Desrozier-Armatur liegt darin, dass alle Drähte ungerader Zahlen (Fig. 34 a) — von denjenigen gerader Zahlen getrennt — je auf besonderen Rahmen abgewickelt werden. Fig. 34 b illustriert die Verbindungsweise für eine Armatur mit 64 Drähten.



Fig. 34 a.

Ebenfalls nach dem Wicklungsschema 34 a sind die sogenannten

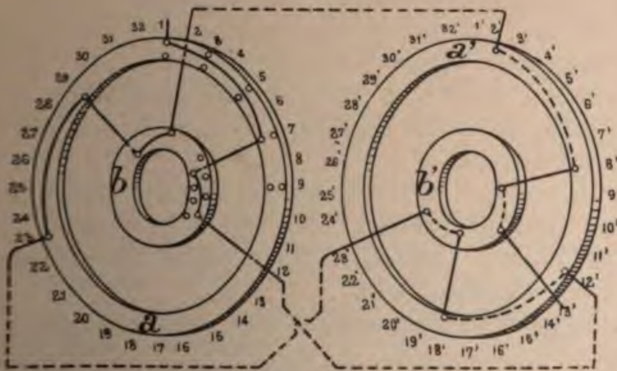


Fig. 34 b.

„Radanker“ von Fritsche ausgeführt. Da indessen ihre Eigentümlichkeit speziell in der Konstruktion liegt, werden wir sie später behandeln.

4. Vergleiche der Ring- und Trommelwicklungen.

Nach der Form der Eisenbleche lassen sich die Armaturen wie folgt einteilen:

a) Glatte Armaturen (Fig. 35, Anordnung *a*), bei welchen die Drähte in einer oder mehreren Lagen gleichmässig am Umfange verteilt sind;

b) Zacken- oder Nutenarmaturen (Anordnung *b*), bei welchen die Drähte in Kanälen untergebracht werden;

c) Locharmaturen (Anordnung *c* und *d*) zuerst von Wendström angewandt;

d) Locharmaturen, bei welchen die Nuten nicht ganz geschlossen sind (Anordnung *e*).

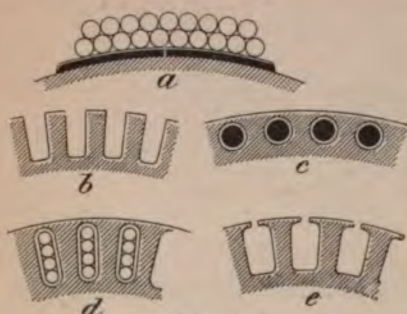


Fig. 35.

Die letztere Anordnung ist derjenigen von Fig. 35 *c* oder *d* vorzuziehen, weil der magnetische Widerstand des Selbstinduktionsstromes, der beim Kurzschlusse einer Spule durch die Bürsten in der neutralen Zone entsteht, vergrössert wird.

Glatte Armaturen sind selbstverständlich am billigsten herzustellen, wenn man vom übrigen Teil der Maschine absieht, dagegen haben sie verschiedene Nachteile. Der wichtigste ist der, dass die Armatur, um den Luftabstand nicht allzusehr zu vergrössern, nicht genügend ausgenutzt werden kann, ferner lassen sich die Magnete solcher Maschinen gewöhnlich nicht so stark sättigen, wie solche mit Zackenarmaturen, sie werden dementsprechend auch etwas empfindlicher für Tourenschwankungen.

Nicht zu vergessen ist auch, dass die Ersparnis in der Herstellung einer glatten Armatur reichlich durch die Mehrkosten des Kupfers auf den Magneten aufgewogen wird, sodass der Gesamtpreis der Maschine kaum beeinflusst wird.

Grammringe werden mit wenigen Ausnahmen als glatte Armaturen ausgeführt.

Bezüglich ihrer praktischen Vorzüge und Nachteile lässt sich von Ring- und Trommelwicklungen folgendes anführen:

Besondere Vorzüge des Gramme-Ringes:

1. Die Spannung zwischen zwei nebeneinander liegenden Armaturdrähten ist Null, infolge dessen sehr grosse Isolationssicherheit. Gramme-Ringe können, wie eine Reihe von Anlagen, ausgeführt durch die Maschinen-

fabriken Oerlikon und Thury, beweisen, bei sorgfältiger Ausführung bis zu 2000—3000 Volt Spannung konstruiert werden.

2. Jeder einzelne Draht kann bei allfälligen Reparaturen in kürzester Zeit und ohne besondere Mühe ersetzt werden; überhaupt ist die ganze Wicklung sehr leicht herzustellen.
3. Besondere Driving horns (in die Armatur eingelassene hervorragende Keile, Stifte etc. zum Mitnehmen der Drähte bei glatten Armaturen) sind häufig entbehrlich, da bei den meisten Konstruktionen durch die Speichen des Armatursternes natürliche Mitnehmer geschaffen sind.
4. Die Zahl der Kommutatorlamellen kann gleich der Anzahl Drähte angenommen werden; wichtig bei Armaturen mit sehr wenigen Drähten.

Hauptsächliche Nachteile sind:

1. Die Drahtlänge ist etwas grösser als bei Trommeln.
2. Bei höhern Sättigungen treten auch Kraftlinien ins Innere und erzeugen in diesen Drähten Ströme von entgegengesetzter Richtung.
3. Der gesamte disponible Armaturquerschnitt ($D \times l$) wird nur sehr schlecht ausgenützt.
4. Die Armaturreaktionen sind infolge der im Innern des Ringes befindlichen Drähte grösser als bei der Trommel.
5. Um die Wicklung im Innern der Armatur unterzubringen, muss der Durchmesser grösser gemacht werden, als dies aus rein elektrischen Rücksichten notwendig wäre. Dieser Übelstand wird besonders bei kleineren Maschinen fühlbar.
6. Der Armaturstern muss aus Bronze hergestellt sein.

Der Hauptvorzug der Flachringarmaturen (mit seitlichen Polen) liegt, abgesehen von dem etwas geringeren Gewichte der Magnete bedingt durch den kürzeren Kraftlinienweg, wohl darin, dass sie eine Magnetkonstruktion ermöglichen, bei welcher die Armatur durch blosses Abheben der Lagerdeckel herausgenommen werden kann, ohne dass es notwendig ist, die Magnete ebenfalls zu demontieren. Dieser Umstand ist bei sehr grossen Maschinen nicht ohne Bedeutung. Die einzige Maschine, bei welcher dieser Vorteil ausgenutzt ist, dürfte die in Amerika sehr verbreitete Shortdynamo sein, von welcher wir in Kapitel IX eine Beschreibung geben. Dieser Vorteil wird einigermassen geschwächt durch den Umstand, dass die Herstellung der Armatur teurer wird, und dass nach Abnutzung der Lager infolge der ungleichen magnetischen Anziehung ein axialer Zug entsteht.

Eine Ausnahme hiervon bildet die vom Verfasser entworfene und von der Maschinenfabrik J. Farcot in Paris patentierte Flachringdynamo für direkte Kupplung (Kapitel IX).

Von den Scheibenarmaturen scheinen sich bis jetzt nur die bekannten Konstruktionen von Desrozier (Maison Breguet) und W. Fritsche bewährt zu haben. Die Schwierigkeit liegt hier zumeist in der konstruktiven Durchbildung der Armatur zur Erreichung einer genügenden Festigkeit, eine Aufgabe, welche hauptsächlich bei dem letzteren Systeme in vorzüglicher Weise gelöst ist (siehe Kapitel IX).

B. Armatur-Reaktion,

Funkenbildung und Bürstenverschiebung.

Armaturreaktion und Funkenbildung werden häufig miteinander verwechselt, da die Gegenwart des einen vielfach auf das Vorhandensein des zweiten schliessen lässt. Nichts destoweniger haben wir es hier mit zwei durchaus verschiedenen Erscheinungen zu thun, welche nur in sehr weitläufigem verwandtschaftlichem Verhältnisse zueinander stehen. Wir müssen uns vor der Hand mit einigen präliminären Erklärungen über das Wesen dieser Erscheinungen begnügen. Ausführlichere Angaben mit Beispielen finden sich in Kapitel VI.

Was die Funkenbildung anbelangt, so benützen wir die Fig. 36. Verfolgt man die Stromrichtung in einer einzelnen Spule vor und

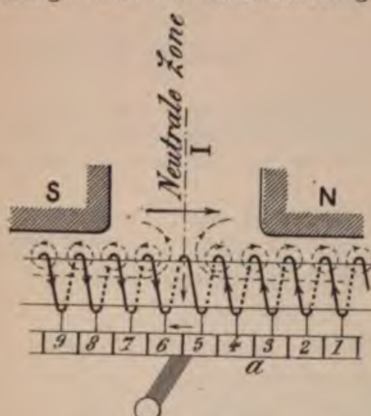


Fig. 36a.

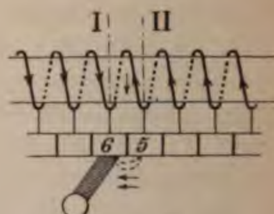


Fig. 36b.

nach dem Kurzschlusse, indem man die Spule z. B. in der Richtung der Bewegung betrachtet, so ersieht man, dass der Strom vor dem Kurzschlusse die Richtung des Uhrzeigers, und nachher entgegengesetzte Richtung hat. Da der Kurzschluss in der neutralen Zone stattfindet, also an einer Stelle, wo die Induktion gleich Null ist, so erscheint es auf den ersten Blick unverständlich, warum beim Unterbruch oder, wie es oft geschieht, schon während dem Kurzschlusse ein Funken entstehen kann. Der Grund hierfür liegt in der sogenannten Selbstinduktion der Spule, welche den Kommutationsvorgang verzögert. Wir haben nämlich bereits auf Seite 1 gesehen, dass jeder stromdurchflossene Leiter magnetische Kraftlinien erzeugt. Mit Hilfe der angegebenen Stromrichtungsregeln ist es ein leichtes, die Richtung dieser Kraftlinien zu bestimmen. Dieselbe sei in Fig. 36a durch die punktierten Linien angedeutet. Sowie nun die Spule $\overline{5,6}$ zum Kurzschlusse gelangt, hat der Strom in dieser Spule die Tendenz, auf Null hinunter-

zusinken, da der Hauptstrom nunmehr direkt von Lamelle 6 und 5 in die Bürsten eintritt. Die magnetische Kraft der Spule und mit ihr die Kraftlinienzahl nimmt daher notwendigerweise ab. Wir haben aber bereits gesehen, dass jede Änderung in der Zahl der Kraftlinien, welche durch eine Spule fliessen, eine E.M.K. erzeugt, und zwar hat diese sogenannte Selbstinduktionsspannung nach der auf Seite 6 stehenden Regel die Richtung des ursprünglichen Stromes. Infolge dessen kann derselbe nicht plötzlich abnehmen, sondern er vermindert sich nach einem Gesetze, das wir weiter unten behandeln werden (Kap. VI).

Wir sehen ferner, dass unmittelbar nach Aufhebung des Kurzschlusses die Spule vom vollen Armaturstrom durchflossen wird. Die

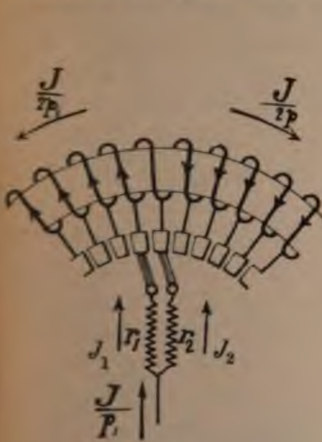


Fig. 37.

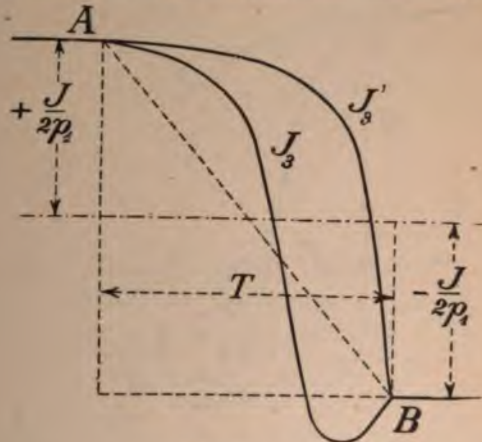


Fig. 38.

gleiche Ursache, welche eine Verzögerung in der Abnahme des Stromes bewirkte, tritt nun auch hemmend dem Anwachsen des umgekehrten Armaturstromes entgegen.

Um den Kommutationsvorgang zu beschleunigen, bringt man die Bürsten in eine solche Lage, dass in der Spule eine E.M.K. induziert wird, welche derjenigen der Selbstinduktion entgegenwirkt. Dies geschieht durch Verschieben der Bürsten nach vorwärts beim Generator, nach rückwärts beim Motor.

Eine wichtige Rolle spielt hierbei auch der variable Kontaktwiderstand, welcher ebenfalls eine Beschleunigung der Kommutation bewirkt. Wir wollen denselben in Fig. 37 durch die vor die Bürsten geschalteten Widerstände r_1 und r_2 darstellen.

Wenden wir uns einen Moment zu den Bürsten, und untersuchen wir etwas näher die Erscheinungen, welche daselbst auftreten. Wie

wir bemerken, nimmt der Strom in der Lamelle 5 von seiner maximalen Stärke $\frac{J}{p_1}$ auf Null ab, und wächst in der Lamelle 6 in genau umgekehrtem Verhältnisse. Während jedoch die Kontaktflächen nach einer Geraden zu- oder abnehmen, folgt der Strom einem ganz anderen Gesetze. Es können daher unter Umständen in einem gewissen Momente Beanspruchungen an den Bürsten entstehen, welche im stande sind, den Kontakt abzuschmelzen und zu verflüchtigen. Um die Sache noch deutlicher zu machen, ist die Änderung des Kurzschlussstromes J_3 in Fig. 38 graphisch dargestellt, und zwar bedeuten J_3 und J_3' zwei solcher Kurven für verschieden grosse Selbstinduktionen

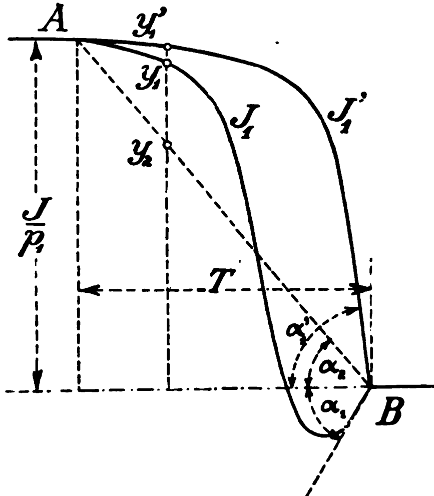


Fig. 39.

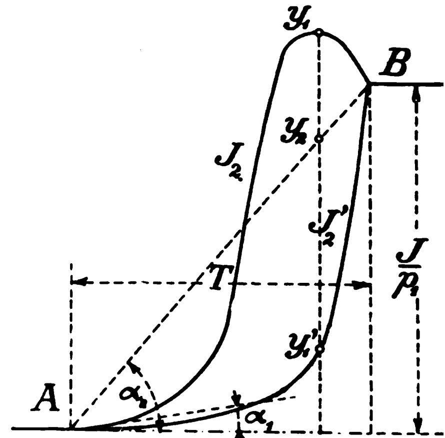


Fig. 40.

der kurzgeschlossenen Spule und verschiedene Bürstenverschiebung. Für die Funkenbildung interessiert uns hauptsächlich die Stromstärke an den Kontaktstellen. Dieselbe kann leicht nach der Kirchhoffschen Regel bestimmt werden. Es ist für die Kontaktstelle links (Fig. 37)

$$J_1 = \frac{J}{2\,p_1} + J_3,$$

für die Kontaktstelle rechts

$$J_2 = \frac{J}{2\,p_1} - J_3.$$

Die Werthe von J_1 und J_2 sind in den Figuren 39 und 40 graphisch aufgetragen.

Die Kurven Fig. 38 bis 40 sind höchst lehrreich, indem sie einen sehr genauen Einblick in das Funktionieren der Maschine

gewähren. Wir sehen einmal, dass die Intensität des Stromes in den Bürsten sehr variabel ist und unter Umständen, während sehr kurzer Zeit den der Konstruktion zu Grunde gelegten Wert

$$\frac{J}{p_1} : \text{Bürstenfläche}$$



Fig. 41.

bedeutend übersteigen kann. Das Verhältnis dieser Stromstärken ist zu einer beliebigen Zeit durch das Verhältnis der Ordinaten y_1 und y_2 gegeben, und lässt mit Leichtigkeit erkennen, zu welchem Zeitpunkte eine Überbeanspruchung der Kontaktflächen eintritt, und worin die Ursache hierfür liegt. Die Gestalt der Kurve J_1 zeigt nebenbei, dass auch eine zu grosse Bürstenverschiebung schädliche Folgen haben kann, indem dann während einer gewissen Zeit ein Strom von entgegengesetzter Richtung entsteht, wodurch hauptsächlich die abgehende Lamelle in Mitleidenschaft gezogen wird. Dies trifft z. B. zu, wenn die Kurve in ihrem letzten Teil gegen den Punkt B sehr steil abfällt. Je mehr sich die Kurve der Geraden AB nähert, umso weniger ist auch eine Funkenbildung zu befürchten. Die Selbstinduktion muss also durch Anwendung einer grossen Zahl Kommutatorsegmente auf ein Minimum reduziert werden. Es genügt auch nicht, die Selbstinduktion durch eine grosse Gegen-E. M. K. auszubalancieren, denn wie soeben gezeigt wurde, kann dadurch kurz vor Unterbruch des Kurzschlusses eine übermässige Beanspruchung der Kontaktfläche stattfinden. Nicht minder wichtig ist es, dass die Bürstenauflagfläche möglichst gross gewählt werde, wobei es zwar keinen Zweck hat, die

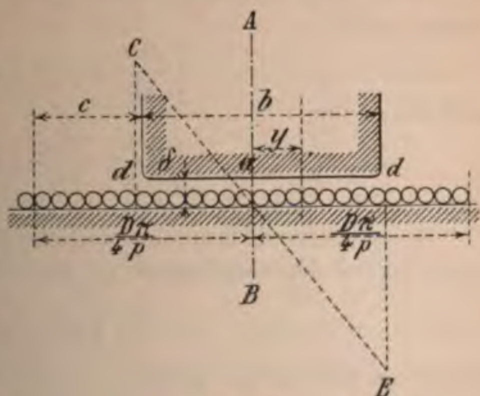


Fig. 42.

Bürstendicke grösser als die Lamellendicke zu nehmen. Ausgenommen bei den auf S. 25 und 34 behandelten Spezialwicklungen. Bei Kohlenbürsten ist dies allerdings nicht zu vermeiden, da sonst der Kommutator zu lang ausfallen würde.

Wir wenden uns nun zur Besprechung der eigentlichen Armaturreaktion und ihrer Folgen. Fig. 41 stellt eine stromdurchflossene Armatur im magnetischen Felde vor. Sämtliche Armaturdrähte oberhalb der neutralen Zone mq sind von einem gleichgerichteten Strom durchflossen, desgleichen alle Drähte unterhalb mq, letztere jedoch in umgekehrter Richtung. Eine naturgemässe Folge davon ist, dass in der Armatur magnetische Kraftlinien erzeugt werden, welche ungefähr den in Fig. 41 angedeuteten Verlauf nehmen. Während jedoch die von den Magneten herrührende Kraftliniendichte längs nop eine gleichmässige ist, nimmt die von der Armatur allein erzeugte Dichte, vom Punkte o ausgehend, gegen die Polspitzen positiv und negativ stetig zu, fällt aber nachher sofort wieder rasch herunter.[1])

Um dies noch deutlicher zu zeigen, benutzen wir die Fig. 42. Es bedeutet hierbei k die Anzahl aw pro cm Armaturumfang und δ den Abstand des Armatureisens von den Polen, ferner sei die Stromrichtung in den Drähten derart angenommen, dass die um einen einzelnen Draht kreisenden Kraftlinien die Richtung des Uhrzeigers haben. Greifen wir irgend einen Punkt im Abstande y von der magnetischen Axe AB heraus, so steht derselbe, wie ersichtlich, unter der Einwirkung der sowohl links als rechts davon gelegenen Windungen, und zwar wirken daselbst:

$$\left(\frac{D\pi}{4p} + y\right) k \ aw$$

nach unten und

$$\left(\frac{D\pi}{4p} - y\right) k \ aw$$

nach oben.

Die resultierende magnetomotorische Kraft ist daher gleich $2\,y\,k\,aw$, denen gemäss den Gleichungen (1) und (2) Seite 2.

$$\frac{4\pi}{10} 2\,y\,k \frac{1}{2\delta}$$

Kraftlinien pro cm² entsprechen.

Wir vernachlässigen hierbei den magnetischen Widerstand des Eisens gegenüber dem viel grössern Luftwiderstand. An den Polecken wäre somit:

$$(24) \qquad B = \frac{4\pi}{10} b\,k \frac{1}{2\delta} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J}{2p_1} N \frac{b}{D\pi} \cdot \frac{1}{2\delta}$$

---

[1]) Vergl. Kapitel VI.

und in der neutralen Zone:

$$B' = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{D\pi}{2p} k \frac{1}{2\delta_1} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J}{4p \cdot p_1} \cdot N \cdot \frac{1}{2\delta_1} \tag{25}$$

Für δ_1 ist die Länge der Kraftlinien in der neutralen Zone vom Armatureisen bis zu den Polen einzusetzen, es sei denn, dass der Abstand zum Magnetbügel noch kleiner ist, in welchem Falle dieser letztere Wert einzusetzen ist. Die Grösse

$$\frac{J}{4pp_1} N$$

wird auch als Ampère-Windungen der Armatur bezeichnet, im Gegensatz zu den Ampère-Windungen der Magnete.

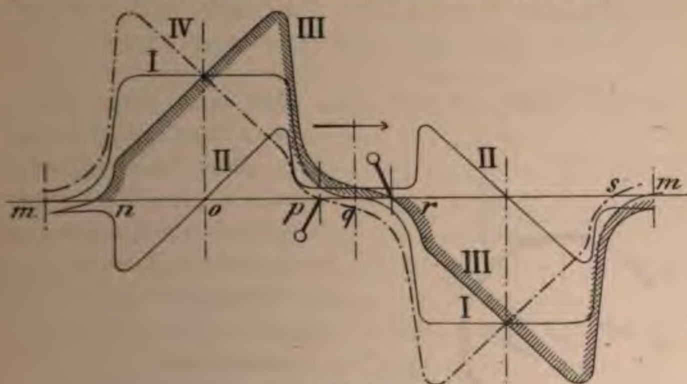


Fig. 43.

Trägt man nun die Magnetinduktion I und die Armaturreaktion II in Fig. 43 graphisch auf und addiert ihre Werte, so stellt die Kurve III die Form des kombinierten Feldes für einen Generator dar. Beim Motor ist für gleiche Drehrichtung der Ankerstrom umgekehrt. Das resultierende Feld ist dargestellt durch die Kurve IV.

Die Fig. 43 lässt auch leicht erkennen, dass unter Umständen die Kraftliniendichte der Armaturreaktion diejenige der Magnete überwiegen kann. Die Pole werden dadurch an ihren Ecken umgekehrt magnetisiert. Solche Verhältnisse sind natürlich unzulässig und kommen nur bei schlechten Maschinen vor.

Um sie zu vermeiden, muss

$$B < B_l$$

sein. B_l gleich Kraftliniendichte, herrührend von den Magneten.

Dies ist der Fall für

$$\frac{4\pi}{10} b k \frac{1}{2\delta} < B_l \text{ oder } k < 1{,}6 \frac{B_l \delta}{b}$$

oder für *b* und *k* die Werte eingesetzt

(26) $$N < \frac{10 . B_l . \delta . p_1}{b J} < 6{,}37 \frac{B_l}{J} . \frac{\delta . p . p_1}{\beta}$$

Daraus folgt, dass die Anzahl *aw* pro cm Umfang (*k*) umso grösser sein kann, je mehr Pole die Maschine besitzt, d. h. je kleiner *b* ist. Ferner hängt diese Grösse vom Wicklungsraum ab, da es, ganz abgesehen von der Armaturreaktion, nicht möglich ist, beliebig viele Drähte auf dem Armaturumfang zu plazieren.

Für Trommelarmaturen von 100—150 Volt und nicht zu geringe Tourenzahlen werden ungefähr folgende Verhältnisse angetroffen:

Kilowatt	5	10	20	40	100	150
$k =$	90	100	115	130	145	160

Bei glatten Ringen ist diese Zahl nicht selten etwas kleiner.

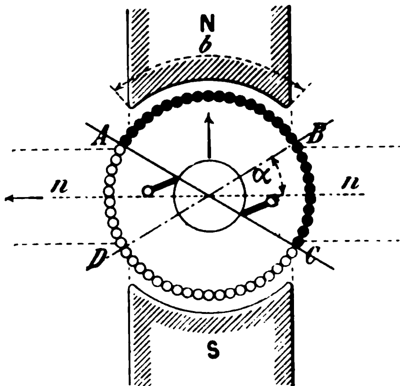


Fig. 44.

Die Armaturreaktion macht sich durch einen Spannungsabfall bemerkbar, welcher unter ungünstigen Umständen einen 4 bis 5 mal grössern Wert annehmen kann, als dies durch den Ohm'schen Verlust allein bedingt wäre. Obwohl dieser von der Armaturreaktion herrührende Spannungsabfall nicht einem Energieverlust entspricht, hat er doch die unangenehme Folge, dass proportional mit demselben die Leistungsfähigkeit der Maschine vermindert und deren Regulierung erschwert wird.

Betrachten wir in Fig. 44 die Richtung des Stromes in den Armaturdrähten und die magnetische Wirkung in Bezug auf die Pole *N* und *S*, so ist ersichtlich, dass wir uns die Armaturwicklung durch zwei getrennte Spulen ersetzt denken können, von denen die erste, *ADBC*, Kraftlinien in der Richtung der magnetischen Axe (Längsmagnetisierung), die andere, *ABDC*, Kraftlinien senkrecht zur magnetischen Axe (Quermagnetisierung) erzeugt.

Indem wir ferner die Polarität dieser Felder untersuchen, gelangen wir zu dem folgenden, sowohl für Generatoren, als Motoren geltenden Schlusse:

1. Das durch die Spule *ADBC* gebildete Feld sucht die Pole *N*

und S zu schwächen. Die entmagnetisierenden $a\,w$ sind gleich:

$$\frac{\alpha}{360}\cdot\frac{J.N}{p.p_1}$$

und haben einen Kraftlinienstrom Φ' in entgegengesetzter Richtung zur Folge.

2. Die Spule $A\,B\,C\,D$ erzeugt ein neues Feld Φ'' in der Richtung der neutralen Zone. Berücksichtigen wir seine Polarität, sowie die Bürstenverschiebung, so ist ersichtlich, dass in den Drähten, welche sich in demselben befinden, eine E.M.K. erzeugt wird, welche sich zu der vom magnetischen Felde der Maschine herrührenden E.M.K. addiert.

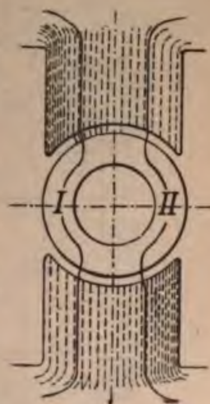


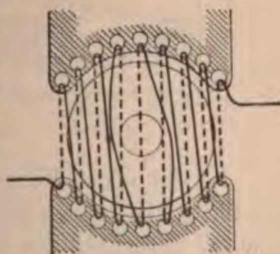
Fig. 45.

Die Armaturreaktion macht sich nicht allein durch die direkte magnetisierende oder entmagnetisierende Wirkung, hervorgerufen durch die Bürstenverschiebung, bemerkbar; sie äussert sich auch, wenn die Bürsten sich in der neutralen Zone befinden und bewirkt eine Verzerrung des magnetischen Feldes und eine ungleiche Sättigung in den Polen. Dadurch entsteht aber notwendigerweise eine Schwächung des Feldes und ein Spannungsabfall.

Es betrage in den Magneten (Schmiedeisen) einer Maschine bei Leerlauf die Sättigung

$$B_m = 10\,000 \text{ Kraftlinien pro cm}^2 \; (\mu = 2000),$$

und es verursache die Armaturreaktion bei Normalbelastung eine Verzerrung des Feldes so, dass auf der einen Seite der Pole eine Sättigung von 18000 Kraftlinien ($\mu = 126$) auftritt. Auf der andern Seite gehen dann noch 2000 Kraftlinien pro cm² ($\mu = 2000$) durch.


Fig. 46.

Mit Benutzung der Gl. (18) ergiebt dies eine Leitungsfähigkeit

$$\mu_1 = 2\,.\frac{126 \times 2000}{126 + 2000} = 236$$

gegenüber $\mu = 2000$ bei Leerlauf.

Wir sehen also, dass die magnetische Leitungsfähigkeit bedeutend verringert worden ist; die $a\,w$ der Maschine werden daher nicht mehr genügen, um die frühere Anzahl Kraftlinien zu erzeugen.

Um die Längsmagnetisierung möglichst zu vermindern, muss der Winkel α verkleinert werden, was keine Schwierigkeiten bietet.

Zur Reduktion der Quermagnetisierung hat der Verfasser in den frühern Ausgaben dieses Buches und in verschiedenen Artikeln eine Reihe von Mitteln vorgeschlagen, welche seither in der Praxis häufig Anwendung gefunden haben.[1])

Dieselben lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

1. direkt wirkende,
2. indirekt wirkende.

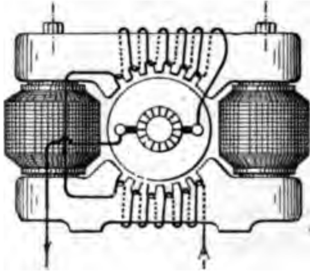


Fig. 47.

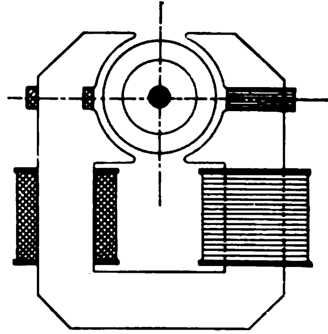


Fig. 48.

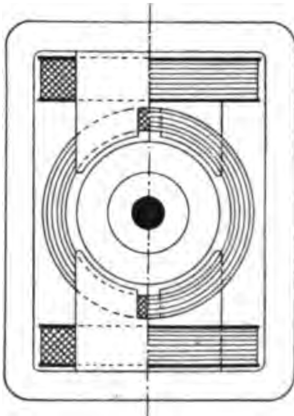


Fig. 49.

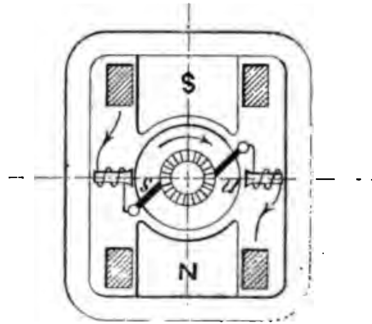


Fig. 50.

Zu der ersten Klasse gehören die Kompensationswicklungen Fig. 46 bis 49, welche auf den Magneten so angeordnet sind, dass ihre magnetische Axe mit derjenigen der Armatur zusammenfällt, jedoch mit umgekehrter Richtung der Kraftlinien.[2]) Selbstverständlich muss die Kompensationswicklung vom Hauptstrome durchflossen sein.

[1]) 1. Auflage März 1891, 2. Auflage Jan. 1892, Elektrot. Zeitschrift, Febr. 1893, Sept. 1896, Industrie Eléctrique, März 1898.

[2]) Eine analoge Anordnung wurde von Prof. Ryan dreiviertel Jahre nach den ersten Veröffentlichungen des Verfassers angegeben (Sibley Journal of Eng. Okt. 1892).

Die resultierende magnetomotorische Kraft ist dann gleich der Differenz der *a w* des Ankers und dieser Hilfswicklung. Dieselbe hat übrigens einen doppelten Einfluss, indem sie nicht nur die Verzerrung des Feldes verhindert, sondern auch in der Richtung der neutralen Zone Magnete erzeugt, welche die nämliche Polarität haben, wie die Elektromagnete, welche in der Drehrichtung folgen.

Wenn wir von der Verzerrung des Magnetfeldes absehen, so handelt es sich darum, dieser Spule eine solche Zahl *a w* zu geben, dass die damit erreichte Feldstärke gleich der Liniendichte jenes Punktes im Magnetstreufelde wird, an welchem die Kommutation ohne Funkenbildung vor sich geht.

Eine konstruktive Ausführung der Anordnung Fig. 46 ist erst bei sehr grossen Stromstärken von einigen Tausend Ampère erreichbar, wobei dann eine einzige Windung genügt, sodass sämtliche Stäbe parallel geschaltet werden können.

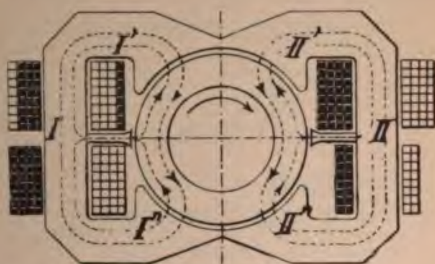


Fig. 51.

Der Verfasser hat daher eine modifizierte Anordnung für nur teilweise Kompensation vorgeschlagen und auch probiert, deren verschiedene Varianten aus den Fig. 47—49 ohne weiteres verständlich sind. Bei Fig. 49 ist die Wicklung behufs leichterer Montage nach beiden Seiten zurückgeschlagen.

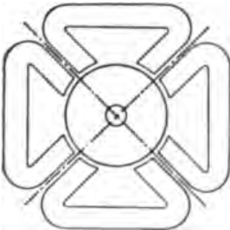
Es mag an dieser Stelle noch eine Anordnung von M. Menges[1]) und Swinburne erwähnt werden, welche den Zweck hat, die Bürstenverschiebung zu vermindern und die Funkenbildung zu unterdrücken. Dieselbe besteht aus zwei kleinen Hilfspolen, welche das zur Kommutation nötige Feld erzeugen (Fig. 50). Es ist daher möglich, die Bürsten in ihrer ursprünglichen Lage zu lassen.

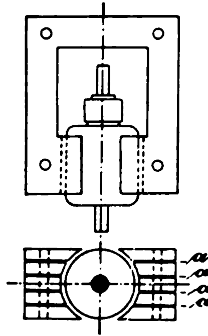
---

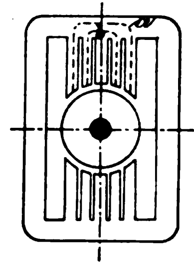
[1]) C. L. Menges war offenbar einer der ersten, welcher sich mit dem Studium der Armaturreaktion befasste; über seine Arbeiten, welche in zwei deutschen Patenten niedergelegt sind, liegen jedoch meines Wissens keine Veröffentlichungen vor. Besonders interessant ist sein Patent Nr. 34465 vom 6. Dezember 1884, welches sowohl eine der Fig. 47 analoge Wicklung als auch eine zweite Anordnung enthält, bei welcher die Hilfsspulen ähnlich wie Fig. 50 in der neutralen Zone angebracht sind. Die im Patente angeführte Maschine (Fig. 15 Tafel II) ist insofern für die Demonstration ungünstig gewählt, als hier zufolge der unsymmetrischen Feldanordnung die Benutzung von Eisenkernen in den Hilfsspulen unzulässig ist, entgegengesetzt der in der Patentbeschreibung enthaltenen Bemerkung.

Eine Maschine dieser Art, von der Electro-Dynamic Co. in Philadelphia ist seit 5 Jahren im neuen Pier der American Line in New-York aufgestellt und giebt sehr befriedigende Resultate. Ein besonderer Vorteil dieses Systems besteht noch darin, dass es sich leicht an ausgeführten Maschinen anbringen lässt.

Dieses Verfahren kann bei gewissen symmetrischen Maschinentypen, z. B. Manchestertype, Dynamo Thury etc. eine wesentliche Vereinfachung erfahren, welche darin besteht, dass die Hilfswicklung ganz vermieden wird. Es kann bei den genannten Maschinenformen jede Kompensationswicklung in zwei Spulen geteilt werden, welche im umgekehrten Sinne direkt auf die Magnetspulen aufgewickelt sind (Fig. 51).


Fig. 52.


Fig. 53.


Fig. 54.

Bezeichnen wir mit $\mathfrak{J}m$ die magnetisierenden *a w* des magnetischen Stromkreises *I* und mit $\mathfrak{J}m'$ die Zahl der *a w* jeder Kompensationswicklung, so betragen die auf den Stromkreis *I'* einwirkenden *a w*

$$\frac{\mathfrak{J}m}{2} - \mathfrak{J}m'$$

die auf den Stromkreis *I''* einwirkenden *a w*

$$\frac{\mathfrak{J}m}{2} + \mathfrak{J}m'.$$

Die Summe dieser *a w* ist demnach $= \mathfrak{J}m$, d. h. gleich den *a w* der Magnetspule. Wie ersichtlich, kann man nun aber diese Kompensationswicklung mit der eigentlichen Magnetwicklung zu einer einzigen Spule vereinigen, und es genügt, die Wicklung in zwei ungleichen Hälften so auf den Seiten des kleinen Poles anzubringen, dass die Differenz der *a w*

$$2\,\mathfrak{J}m'$$

beträgt.

Die indirekten Methoden zur Verringerung der Armaturreaktion beruhen darauf, durch geeignete Anordnung der Magnetfelder den

magnetischen Widerstand der von der Armatur gebildeten Kraftlinien zu vergrössern, ohne dass dadurch auch der Widerstand für die von den Magneten erzeugten Kraftlinien vermehrt wird.

Wie die Fig. 52—54 zeigen, kann dieser Zweck erreicht werden durch teilweise oder vollständige Trennung der magnetischen Stromkreise. Der Kraftlinienstrom, hervorgerufen durch die Armaturreaktion, ist dann gezwungen, die verschiedenen magnetischen Widerstände zu durchsetzen.

Eine zweite, obwohl weniger wirksame Methode besteht darin, dass die Pole mit einer Anzahl tiefer Nuten versehen werden. Die erste Maschine, welche der Verfasser nach diesem System baute, lief bereits im Dezember 1890 in der Maschinenfabrik Oerlikon.

Eine vollständige Trennung der magnetischen Kreise ist bei weitem günstiger, da blosse Einschnitte allerdings die Armaturreaktion herabdrücken, gleichzeitig aber auch den Spannungsabfall vergrössern.

C. Armaturverluste.

Die Gleichung (10) lässt sich nicht ohne weiteres zur Berechnung von Armaturen benutzen, weil sie in der angegebenen Form kein Urteil über den Gang, Nutzeffekt und die Erwärmung der Maschine gestattet.

Bevor deshalb an die eigentliche Berechnung von Armaturen geschritten werden kann, ist es unerlässlich, die verschiedenen, in denselben auftretenden Verluste einer genauen Berechnung zu unterwerfen. Die Armaturverluste setzen sich wie folgt zusammen:

1. Voltverlust im Kupfer;
2. Verlust durch Ummagnetisierungsarbeit (Hysteresis);
3. Verlust durch Foucaultströme (Wirbelströme);
4. Reibungsverluste;
5. Spannungsabfall durch die Armaturreaktion.

Obwohl der letztere kein eigentlicher Verlust ist, indem er keinen äquivalenten Energieverlust zur Folge hat, so mag er doch hier aufgeführt werden, weil dadurch die Leistung der Maschine vermindert wird.

1. Ohm'scher Spannungsverlust.

J totaler Maschinenstrom in Ampère;

p_1 Anzahl Stromverzweigungen à 2 Ästen gleich halber Zahl Bürstenstifte (nicht Bürsten, weil auf dem nämlichen Stift mehrere Bürsten angebracht werden können);

$e = \varepsilon E$ Spannungsverlust in Volt;

R Widerstand eines Stromkreises zwischen 2 Bürsten in heissem Zustande. (Die Erwärmung ist hierbei zu ca. 55° angenommen: folglich Widerstandskoeff. $= \frac{1{,}2}{60} = \frac{1}{50}$ vergl. S. 17);

N totale Zahl Drähte rings um die Armatur;

$\mathfrak{L}$ mittlere Länge einer Windung bei Gramme-Armaturen, bei Trommeln gleich Drahtlänge sämtlicher Drähte samt Verbindungen geteilt durch *N*, in Meter;

s Drahtquerschnitt in mm².

(27) $$R = \frac{\mathfrak{L} . N}{50 . s . 2 p_1} = \frac{\mathfrak{L} . N}{100 . s . p_1}.$$

(28) $$e = \frac{R . J}{2 p_1} = \frac{\mathfrak{L} . N . J}{50 . s\, 4 p_1^2} = \frac{\mathfrak{L} . N . J}{200 . s p_1^2}.$$

Der gesamte Wattverlust in der Armatur ist folglich:

(29) $$w = e\, J = \frac{\mathfrak{L} . N J^2}{50 . s\, 4 p_1^2} = \frac{\mathfrak{L} . N J^2}{200 . s . p_1^2}.$$

Bezeichnet man mit *i* die Stromdichte, d. h. die Anzahl Ampère per mm² Drahtfläche, so ist

$$J = s . i . 2 p_1,$$

folglich

(30) $$e = \frac{\mathfrak{L} . N . s\, i . 2 p_1}{50 . s . 4 p_1^2} = \frac{\mathfrak{L} . N i}{100 p_1}.$$

(31) $$w = \frac{\mathfrak{L} . N . s^2 . i^2 . 4 p_1^2}{50 . s . 4 . p_1^2} = \frac{\mathfrak{L} . N . s\, i^2}{50}.$$

$\mathfrak{L} . N s$ bedeutet aber nichts anderes als den Kupferinhalt in cm³. Das Kupfergewicht einer Armatur beträgt folglich für einen gesamten Wattverlust *w*

(32) $$\text{Gewicht} = 0{,}535 \frac{w}{i^2} \text{ kg}$$

in kaltem Zustande, oder mit Berücksichtigung der Erwärmung auf ca. 55° C.

(33) $$\text{Gewicht} = \text{ca. } 0{,}45 \frac{w}{i^2} \text{ kg}.$$

Diese Formel ist insofern von Nutzen, als sie für Projektberechnungen, wo eine sehr grosse Genauigkeit nicht verlangt wird, gestattet, ohne vorherige Aufzeichnung der Armatur das Kupfergewicht zu bestimmen.

Beispiel 1. Wie gross ist das Kupfergewicht einer Maschine von 500 Kilowatt bei 1,5 % Verlust und einer Beanspruchung $i = 1{,}5$ Ampère pro mm²?

$$\text{Gewicht} = \text{ca. } 0{,}45 . \frac{0{,}015 . 500\,000}{1{,}5^2} = 1500 \text{ kg}.$$

Tabelle der Voltverluste pro 100 m bei 0° C.

i	e	i	e	i	e	i	e
0,1	0,166	0,9	1,50	1,7	2,83	3	5,00
0,2	0,333	1,0	1,66	1,8	3,00	3,2	5,33
0,3	0,500	1,1	1,83	1,9	3,16	3,4	5,66
0,4	0,666	1,2	2,00	2,0	3,33	3,6	6,00
0,5	0,833	1,3	2,16	2,2	3,66	3,8	6,33
0,6	1,000	1,4	2,33	2,4	4,00	4	6,66
0,7	1,166	1,5	2,50	2,6	4,33	4,5	7,50
0,8	1,33	1,6	2,66	2,8	4,66	5	8,00

Beispiel 2. Die Armatur einer zweipoligen Maschine, für 50 A. und 65 V. gebaut, habe 200 Drähte von je 3,3 mm Dicke (nackt), folglich ist

$$i = \frac{50}{2} \cdot \frac{1}{\frac{3{,}3^2 \cdot \pi}{4}} = 2{,}9 \text{ A.}$$

Länge einer Windung angenommen . . . . = 0,7 m;

Länge der Windungen zwischen 2 Bürsten $= \frac{200}{2} \cdot 0{,}7$ . . . . . . = 70 m;

folglich Spannungsverlust (nach obig. Tab.)

$$e = 0{,}7 \cdot 4{,}8 = 3{,}4 \text{ V.}$$

totaler Verlust in Watt = 3,4 . 50 = 170 (bei 0° C).

Beispiel 3. Welches sind die Armaturverluste in einer sechspoligen Maschine für 1000 A. und 20 V., wenn $N = 80$, $p_1 = 3$, $d = 9$ mm?

Länge einer Windung . . . . = 0,9 m.

Länge der Windungen zwischen zwei Bürsten $= \frac{80 \cdot 0{,}9}{6}$ . . . . = 12 m.

Beanspruchung $i = \frac{1000}{2 \cdot p_1 \cdot s} = \frac{1000}{2 \cdot 3 \cdot 63{,}5}$ . . . . = 2,6 A.

Daher Spannungsverlust (nach Tabelle) = 4,33 . 0,12 = 0,52 V.

Totaler Wattverlust = 0,52 . 1000 = 520 Watt = 2,6 % (3,1 % heiss).

Anmerkung. Sehr bequem für solche Rechnungen ist die am Schlusse des Buches stehende Tab. II.

2. Hysteresis.

Fasst man einen beliebigen Querschnitt des Armatureisens ins Auge und verfolgt man seine Magnetisierung während einer ganzen Umdrehung, so ersieht man, dass sich die Richtung der durch denselben fliessenden Kraftlinien so viele Mal ändert, als Pole vorhanden sind. Die minimale *Magnetisierung* tritt stets ein, wenn dieser Quer-

schnitt mit einer Polaxe zusammenfällt. An dieser Stelle ist sie gleich Null. Von hier an nimmt die Kraftliniendichte beinahe proportional der fortschreitenden Bewegung zu, bis sie in der neutralen Zone ein Maximum erreicht, um nachher wieder auf Null zurückzukehren. Es liegt nun dem Eisen eine gewisse Trägheit inne, welche den Magnetismus auf gleicher Höhe zu erhalten sucht. Die naturgemässe Folge ist, dass bei zunehmender Magnetisierung die Kraftliniendichte geringer, bei abnehmender Erregung höher ausfällt, als sich bei länger andauernder gleichmässiger Erregung ergeben würde. Fig. 55, welche wir dem Buche von Silv. Thompson entnehmen, zeigt einen solchen Kreislauf nach Versuchen an weichem Stahldraht.

Die zwischen den Kurven *a* und *b* enthaltene Fläche stellt den sogenannten Hysteresisverlust dar.

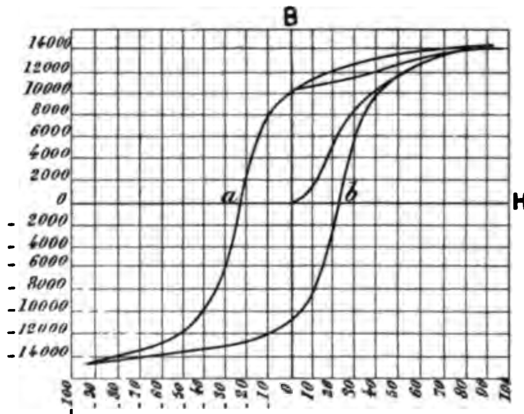


Fig. 55.

Dieser Verlust ist innerhalb der praktisch in Frage kommenden Grenzen genau proportional der Zahl Perioden oder Cycles ω (zweimalige Polwechsel) und dem Eisengewichte. Die experimentelle Untersuchung dieser Erscheinung verdanken wir in erster Linie Prof. J. A. Ewing¹), von dem auch die in nachstehender Tabelle (Versuchsreihe *a*) enthaltenen Zahlen herrühren. Die Versuchsreihe *b* bezieht sich auf neuere Experimente, angestellt an 5 verschiedenen Transformatorblechen der Firma Sankey & Sons, London. (Siehe Elektrotechnische Zeitschrift, Mai 1895.)

Kraftlinien pro cm² *B*.	Wattverlust pro cm³ während einer vollständigen Periode	
	Versuchsreihe *a*	Versuchsreihe *b*
1000	—	90 bis 120 $\times 10^{-7}$
2000	480 $\times 10^{-7}$	220 „ 400
3000	800	410 „ 790
4000	1230	645 „ 1220

¹) Phil. Trans. Th. II. Nr. 238, 1885; ferner Electrician, Juni 1890.

Kraftlinien pro cm² *B.*	Wattverlust pro cm³ während einer vollständigen Periode	
	Versuchsreihe *a*	Versuchsreihe *b*
5000	1700	910 bis 1710
6000	2200	1200 „ 2250
7000	2760	1530 „ 2940
8000	3450	1920 „ 3720
9000	4200	2320 „ 4550
10000	5000	—
11000	5820	—
12000	6720	—
13000	7650	—
14000	8650	—
15000	9670	—

Es mag hier gleich bemerkt werden, dass die obigen Blechsorten von besonders guter Qualität sind, indem ihre Verwendung für Transformatoren einen möglichst geringen Hysteresisverlust erheischt. Die Gesetze der Hysteresis mit Bezug auf den Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Eisens sind zur Stunde noch wenig bekannt. Es scheint, dass hierbei die Fabrikationsweise eine bedeutendere Rolle als die chemische Zusammensetzung spielt.

Überraschen dürfte eine Bemerkung der Firma Oeking & Cie in der Elektrotechnischen Zeitschrift (25. Mai 1897), wonach der Hysteresisverlust nach erfolgtem Ausgleichen an den Probestücken um 10 % zugenommen hatte. Eine ähnliche Beobachtung hat übrigens auch der Verfasser gemacht; indem der Hysteresisverlust bei ausgeführten Maschinen gewöhnlich etwas grösser ist, als wenn man das Eisenblech vor seiner Verarbeitung prüft. Desgleichen zeigten Transformatoren nach längerer Betriebsdauer eine Zunahme dieses Verlustes an.

Von grossem praktischen Werte sind die von Chas. Proteus Steinmetz veröffentlichten Arbeiten (siehe Elektrotechnische Zeitschrift, Heft 4, 1892), worin sehr einfache Formeln für die Berechnung des Hysteresisverlustes angegeben sind.

Nennt man

$\omega = \frac{np}{60}$ die Periodenzahl,

V den Eiseninhalt in cm³, und

η einen Zahlen-Koefficient, so ist nach Steinmetz

(34) $$\text{Hysteresisverlust} = \eta \,.\, B^{1,6} \,.\, \omega \,.\, V \,.\, 10^{-7} \text{ Watt.}$$

Die Werte von η und $\eta \,.\, B^{1,6}$ können auch den am Schlusse des Buches enthaltenen Tabellen IV, V und VI entnommen werden. Die Versuchsreihe *a* der Tabellen auf S. 54 und 55 entspricht nach Tab. VI einem Koeff. η = ca. 0,002. Die für Gleichstrommaschinen benutzten Eisensorten sind im allgemeinen wegen der geringeren Periodenzahl etwas schlechter. Um sicher zu gehen, nehmen wir η = ca. 0,003.

Beispiel 1. Die auf Seite 53 angeführte 6 polige Maschine läuft mit 800 Touren per Minute. Wie gross ist der durch Hysteresis verursachte Verlust, wenn der Kubikinhalt des Armatureisens 19000 cm³ ist und die maximale Kraftliniensättigung 8000 Linien beträgt?

$$\text{Peroiden } \omega = \frac{p \,.\, n}{60} = \frac{3 \,.\, 800}{60} = 40.$$

Wir setzen η = 0,003, dann ist nach Tab. VI

$$\text{der Wattverlust} = 5274 \,.\, 40 \,.\, 19000 \,.\, 10^{-7} = 400 = 2\,^0/_0.$$

Es ist nun die Frage offen:

Wie wären die Eisendimensionen zu verändern, wenn man statt dem gefundenen Verlust von 400 Watt nur 300 zulassen wollte?

Für 300 Watt ist angenähert, indem wir schätzungsweise statt 19000 cm³ 21000 cm³ annehmen,

$$\eta \,.\, B^{1,6} = \frac{300 \,.\, 10^{-7}}{40 \,.\, 21\,000} = 3580.$$

Nach der Tabelle VI liegt B hierfür zwischen 6000 und 6500 Linien, die gewünschte Sättigung ist daher vielleicht 6300.

Beispiel 2. Es seien zwei Eisensorten gegeben, wovon die erstere η = 0,004, die zweite η_1 = 0,003 besitzt. Der Preis der ersteren sei —.35 Frcs. pro kg, derjenige der zweiten Eisensorte —.45 Frcs pro kg.

Frage: Welche der beiden Eisensorten kommt bei gleichem Wattverluste billiger zu stehen?

Der äussere Durchmesser sei in beiden Fällen der gleiche.

S = Querschnitt in cm²,
L = Mittlerer Umfang.

$$B = \frac{\Phi}{S} \qquad V = S \times L$$

Für gleichen Verlust muss sein:

$$0{,}004 \left(\frac{\Phi}{S}\right)^{1,6} . \, S \,.\, L = 0{,}003 \left(\frac{\Phi}{S_1}\right)^{1,6} . \, S_1 \,.\, L_1.$$

Annäherungsweise sei $L_1 = 1{,}07\,L$ gesetzt, dann ist

$$\frac{S_1}{S} = \left(\frac{0{,}003}{0{,}004} \,.\, 1{,}07\right)^{\frac{1}{0,6}} = 0{,}669$$

$$\frac{\text{Preis des besseren Eisens}}{\text{Preis des schlechteren Eisens}} = 0{,}669 \,.\, 1{,}07 \,.\, \frac{45}{35} = 0{,}92.$$

Wir sehen, der Preisunterschied ist in diesem Falle nicht sehr gross, nehmen wir jedoch η = 0,003 und η_1 = 0,002, so wird

$$\frac{S_1}{S} = \left(\frac{0{,}002}{0{,}003} \cdot 1{,}07\right)^{\frac{1}{0,6}} = 0{,}57$$

$$\frac{\text{Preis des besseren Eisens}}{\text{Preis des schlechteren Eisens}} = 0{,}57 \,.\, 1{,}07 \,.\, \frac{45}{35} = 0{,}785.$$

Die beiden Rechnungen zeigen zur Genüge, dass es unter allen Umständen vorteilhafter ist, eine bessere Qualität zu verwenden, selbst wenn dieselbe pro kg etwas teurer zu stehen kommt.

3. Verlust durch Foucaultströme.

Die unter diesem Namen bekannten schädlichen Wirbelströme treten nicht nur im Kupfer, sondern auch im Eisen auf, sobald dasselbe nicht genügend lamelliert ist. Foucaultströme finden sich überhaupt immer vor, wenn massive Körper in einem magnetischen Feld bewegt, oder einer variablen Magnetisierung ausgesetzt werden.

Ihre Entstehung basiert darauf, dass durch die ungleichmässige Verteilung der Kraftlinien in der Masse lokale Ströme induziert werden, welche einen entmagnetisierenden Einfluss ausüben, und dadurch das Durchpassieren der Kraftlinien beeinträchtigen (Schirmwirkung).



Fig. 56.

Sie treten z. B. sehr leicht an den Polecken der Magnete auf, wenn der Luftabstand δ sehr klein ist und zwar nur an einer Ecke (siehe Fig. 56), ferner bei glatten Armaturen mit massiven Kupferbarren, und äussern sich stets durch eine entsprechende Erwärmung. Bei glatten Armaturen darf folglich der Drahtdurchmesser nicht so stark gewählt werden, wie bei Zackenarmaturen, wo die Kraftlinien ihren Verlauf durch die Zacken nehmen können und deshalb nur verhältnismässig wenige Linien in das Kupfer eindringen. Man rechnet deshalb im allgemeinen eine Drahtdicke von ca. 15 mm als Maximum.

Eine Eigentümlichkeit der Foucaultströme besteht darin, dass der dadurch bewirkte Verlust mit dem Quadrate der Periodenzahl zunimmt. Ist die letztere genügend gross, so fällt auch die Schirmwirkung entsprechend kräftig aus, und dieser Umstand hat wieder seine bestimmten Vorteile, von welchen in der Praxis Anwendungen gemacht werden.

So dürfen beispielsweise die mit den Eisenscheiben parallel laufenden Deckplatten der Transformatorbleche unbedenklich aus Gusseisen hergestellt werden, da die Schirmwirkung bei 40—50 Perioden ein Eindringen der Kraftlinien fast gänzlich verhindert. Für Armatursterne von Grammeringen dagegen muss stets Bronze verwendet werden, weil sich Gussarme zu stark erwärmen würden.

Diese Beobachtung hat der Verfasser in eklatanter Weise an einer Drehstromdynamo mit Gramme-Armatur und gusseisernem Stern machen können. Nicht nur erwärmte sich der Stern aussergewöhnlich, sondern es stellte sich auch bei Belastung eine bedeutende Spannungsdifferenz in den 3 Phasen heraus.

Um den durch Foucaultströme verursachten Verlust zu berechnen, können die bereits bekannten Induktionsformeln benutzt werden. Wir denken uns zu diesem Zwecke das zu untersuchende Stück in der Richtung, in welcher nach den früher behandelten Stromrichtungsregeln Ströme auftreten können, in eine möglichst grosse Zahl paralleler und isoliert angenommener Streifen zerlegt, deren Widerstände leicht zu bestimmen sind.

Desgleichen bietet auch die Berechnung der E.M.Ke., welche in diesen Streifen auftreten, keine zu grosse Schwierigkeit. Die wirkliche

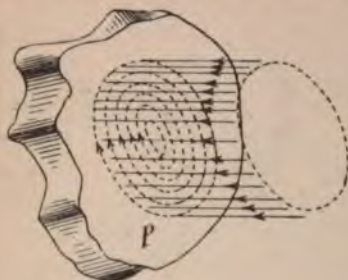


Fig. 57.

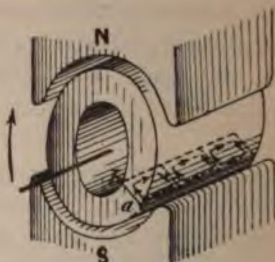


Fig. 58.

Schwierigkeit besteht eigentlich nur darin, aus der Grösse der E.M.Ke. und der Widerstände die Richtung und Stärke der Ströme und den dadurch verursachten Verlust auszurechnen. Gewöhnlich wird hier die Rechnung so kompliziert, dass man es vorzieht, diesen Verlust ganz einfach schätzungsweise anzuschlagen. Verhältnismässig einfach gestaltet sich die Sache bei dem in Fig. 57 dargestellten Falle.

Nehmen wir an, die massive Platte P sei einer variablen Induktion ausgesetzt. Wir können uns nun die Platten in eine Anzahl konzentrischer Ringe zerschnitten denken, in welchen, wie früher gezeigt wurde, Ströme von bestimmter Richtung erzeugt werden. Ihre Grösse hängt einerseits von der Periodenzahl und der Anzahl Linien ab, welche geschnitten werden, und die mit dem Quadrate des Durchmessers zunimmt, und ist umgekehrt proportional dem Widerstande, d. h. dem Durchmesser; wir sehen sofort, dass die Wirbelströme gegen das Centrum hin abnehmen müssen.

Da anderseits der Wattverlust nach Gleichung (9) gleich der Spannung im Quadrate geteilt durch den Widerstand ist, so folgt

daraus, dass der durch Foucaultströme erzeugte Verlust proportional dem Ausdrucke $B^2 \omega^2$ wachsen wird.

Das Auftreten der Foucaultströme im Eisen einer Armatur lässt sich auf die nämlichen Ursachen zurückführen. Zur besseren Erklärung denken wir uns die Armatur als ein Büschel von rund um die Axe und parallel mit derselben gelegten Drähten, die von einander isoliert sind. Es wird daher bei einer Rotation in jedem dieser Drähte eine E.M.K. erzeugt, deren Grösse vom radialen Abstande, bezw. der totalen Zahl Kraftlinien, welche um den Draht kreisen, abhängt. In *a* herrscht die grösste Potentialdifferenz, in *b* ist sie gleich Null, weil hier überhaupt keine Kraftlinienänderung stattfindet.

Diese Erscheinung ist auch noch dann vorhanden, wenn die Armatur als massiver Eisenklotz gedacht wird, und die Folge davon ist eine Cirkulation von Induktionsströmen in axialem Sinn. Um dieselbe zu verhüten, setzt man die Armatur aus Blechscheiben zusammen, die entweder an der Oberfläche oxydiert sind, oder durch Papier isoliert werden (gewöhnliche Dicke 0,5—0,6 mm).

Die früher öfters angewandte Methode, den Armaturkörper durch Aufwickeln von Eisendraht herzustellen, ist in neuerer Zeit fast gänzlich aufgegeben worden. Man ist geneigt, den Grund darin zu suchen, dass der magnetische Widerstand solcher Armaturen grösser ist als derjenige von Armaturen aus Blechscheiben. Es ist jedoch zu bemerken, dass der gesamte magnetische Widerstand einer Maschine dadurch nur sehr wenig beeinflusst wird.

J. A. Fleming giebt für die beiden Konstruktionen folgende Formeln an, um die Foucaultströme zu berechnen:

bei Anwendung von Drähten:

(35) $$\text{Wattverlust} = \frac{(d \cdot \omega \cdot B_{max})^2 \cdot V}{4 \cdot 10^{12}},$$

für Blechscheiben:

(36) $$\text{Wattverlust} = \frac{16\,(a \cdot \omega \cdot B_{max})^2 \cdot V}{10^{12}}.$$

d = Durchmesser des Drahtes in cm;
ω = Periodenzahl per Sekunde;
a = Dicke der Blechscheiben in cm;
V = Eiseninhalt in cm³.

Die Gleichung (36) hat nur Giltigkeit für $a <= 0{,}1$.

Beispiel 1. Wie gross ist der Wattverlust durch Foucaultströme in einer 2 poligen Maschine von 10 Kilowatt und 1000 Touren, für

$$V = 9000;\ B_{max} = 12\,000;\ a = 0{,}05;\ \omega = 16{,}7?$$

$$\text{Wattverlust} = \frac{16\,(0{,}05 \cdot 16{,}7 \cdot 12\,000)^2 \cdot 9000}{10^{12}} = 14{,}4 = 0{,}14\,\%.$$

Beispiel 2. Man berechne den Wattverlust durch Wirbelströme für eine 6polige Maschine von nachstehenden Daten:

$$\begin{aligned} \text{Leistung} &= 26{,}7 \text{ Kilowatt;} \\ \text{Touren} &= 720; \\ B_{max} &= 10\,000; \\ a &= 0{,}05; \\ V &= 23\,000; \\ \omega &= 36. \end{aligned}$$

$$\text{Wattverlust} = \frac{16\,(0{,}05\,.\,36\,.\,10\,000)^2\,.\,23\,000}{10^{12}} = 120 = 0{,}43\,\%.$$

Wir sehen aus den beiden Beispielen, dass die Berechnung der Wirbelströme im Eisenkerne nur für Maschinen mit grosser Periodenzahl notwendig ist, für 2polige Maschinen kann sie dagegen ohne weiteres vernachlässigt werden.

Daraus darf jedoch keinesweg der Schluss gezogen werden, dass die Foucaultströme überhaupt zu vernachlässigen wären. Die Hauptquelle für dieselben sind hauptsächlich die Endplatten, welche zum Zusammenhalten der Bleche dienen, ferner die Zacken bei gezahnten Armaturen, wenn dieselben nicht sorgfältig gefräst und verputzt werden, und nicht zu vergessen die Wicklung selbst. Man darf annehmen, dass auch für eine gut disponierte Maschine der Verlust durch Foucaultströme nicht unter 40—50 % des Hysteresisverlustes beträgt; die Erfahrung zeigt aber anderseits, dass er bei mangelhafter Ausführung 3—4mal so gross sein kann.

Da eine genaue Bestimmung desselben sehr zeitraubend ist, wird man daher gut thun, diesem Umstande bei der Berechnung des Nutzeffektes wenigstens durch eine schätzungsweise ermittelte Zahl Rücksicht zu tragen.

Es muss auch bei dieser Gelegenheit bemerkt werden, dass die obigen Gleichungen (35) und (36) mit gewisser Vorsicht zu gebrauchen sind, da dieselben nur für Transformatoren absolute Giltigkeit besitzen, bei welchen die Kraftliniendichte über dem ganzen Eisenkörper als konstant angenommen werden darf. Bei den Armaturen ist dagegen diese Bedingung von vornherein nicht erfüllt, es entstehen daher an der Oberfläche Ströme parallel zur Drehrichtung und zwar ist der dadurch verursachte Wattverlust gewöhnlich ziemlich gross und übersteigt nicht selten denjenigen der radialen Strömung. Wir werden daher gut thun, die aus Gleichung (35) und (36) erhaltenen Werte a priori mit 2 zu multiplizieren.

Die genannten Formeln lassen sich ferner, wie G. Giles gezeigt hat, nicht auf die Zacken anwenden, da sie von der Annahme ausgehen, dass die Kraftlinienänderung während einer ganzen Periode stetig erfolge. Diese Bedingung ist aber augenscheinlich nicht erfüllt, da

die Kraftlinienintensität, wie wir gesehen haben, an den Polecken beinahe plötzlich auf den maximalen Betrag ansteigt und beim Verlassen der nächstfolgenden Polecke ebenso rasch wieder auf Null hinunter sinkt.

Ein Beispiel mag dies veranschaulichen.

Beispiel 3. Es handle sich um eine 2polige Maschine von 10 *KW* und 1000 Touren mit folgenden Daten:

Anzahl Zacken = 56.

Zackendimensionen = 0,8 . 2,1 . 27 cm = 39,5 cm³.

$$\text{Periodenzahl } \omega = \frac{1000}{60} = 16{,}7.$$

Kraftlinienintensität in den Zacken = 14 000.

Nehmen wir an, nachdem die Zacken sich um eine Strecke gleich 1,5 × dem Abstand zweier Zackenmitten von den Polen entfernt haben, dürfe die darin herrschende Kraftlinienintensität gleich Null gesetzt werden. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich diese Änderung vollzieht, entspricht daher einer

$$\text{Cyclezahl} \quad \omega' = 16{,}7 \cdot \frac{56}{4} \cdot \frac{1}{1{,}5} = 156$$

und da stets 1,5 . 4 = 6 Zacken dieser Änderung unterworfen sind, erhalten wir nach Gleichung (33) einen Verlust

$$\omega = \frac{6 \,.\, 16\,(0{,}06 \,.\, 156 \,.\, 14\,000)^2 \,.\, 39{,}5}{10^{12}} = 65 \text{ Watt} = 0{,}65\,\%_0.$$

4. Lagerreibung.

Die auf die Lager wirkenden Zugkräfte setzen sich zusammen aus dem Gewichte G und dem Riemenzug Z. Letzterer wirkt in der Regel horizontal, der resultierende Lagerdruck ist folglich

$$P = \sqrt{G^2 + Z^2}.$$

Da es für manche Fälle von Vorteil ist, den ungefähren Reibungsverlust zum voraus bestimmen zu können, ohne genötigt zu sein, das Armaturgewicht vorher auszurechnen, so wollen wir es versuchen, für diese Grösse allgemeinere Formeln aufzustellen.

Glücklicherweise variieren die Gewichte von Dynamomaschinen verschiedener Systeme für die nämliche spezifische Leistung W_s (Kilowatt bei 1000 Touren) nicht so sehr von einander, als dass sie nicht bis zu einem gewissen Grade durch eine allgemeine Formel ausgedrückt werden könnten.

Im Mittel beträgt das Gewicht der kompletten Maschine

(37) $$G = 175 \,.\, W_s^{2/3}\,[1].$$

[1] Bei Motoren ist für $W_s \dfrac{736 \,.\, HP}{n}$ zu setzen; der Koefficient lässt sich übrigens für einen bestimmten Type berechnen und bleibt für diesen Type für alle möglichen Grössen beinahe konstant. Bei der Berechnung der Reibungsverluste hat eine kleine Abweichung von den angenommenen Koeffizienten keinen Einfluss, da der Riemenzug im allgemeinen bedeutend grösser ist.

Die max. Abweichungen betragen für kleine Maschinen höchstens 20—35 %, bei grossen gewöhnlich weniger.

Hiervon entfallen ca. 20 % auf die Armatur; bei kleineren Maschinen ist das Armaturgewicht noch geringer. Indem wir für alle Grössen 20 % annehmen, tragen wir einigermassen dem magnetischen Zuge Rechnung. (Bezügl. der Grösse des magnetischen Zuges siehe Kap. VIII.)

Es soll nun W_s die specifische Leistung,
W die Leistung in Kilowatt bei n Touren,
v die Riemengeschwindigkeit bedeuten, dann ist

$$\text{Gewicht der Armatur } G \text{ approx.} = 35 \cdot W_s^{2/3} = 3500 \left(\frac{W}{n}\right)^{2/3}$$

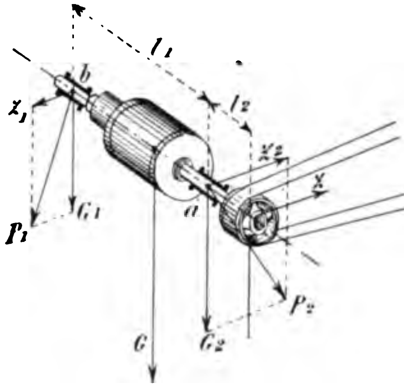


Fig. 59.

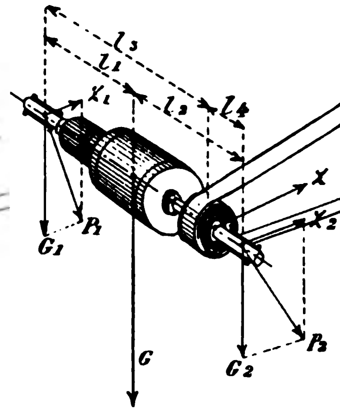


Fig. 60.

$$(38) \qquad \text{Maxim. Riemenzug } Z = \frac{3}{0{,}89} \cdot \frac{W \cdot 1000}{9{,}81 \cdot v} = 345 \cdot \frac{W}{v}$$

bei einem mittleren Nutzeffekt von 89 %.

Es sind nun 2 Fälle zu berücksichtigen:

a) Riemenscheibe fliegend, Fig. 59,

b) Riemenscheibe und Armatur zwischen 2 Lagern, Fig. 60.

Ein dritter Fall ist der mit 3 Lagern, doch wird man hier besser thun, den Reibungsverlust approx. zu 3—3,5 % anzunehmen und diese Zahl nachträglich zu kontrollieren.[1])

[1]) Wollte man diesen Verlust genau bestimmen, so ist dies nur mittelst sehr komplizierter Formeln möglich. Es genügt jedoch vollständig, die nachstehende Methode einzuschlagen:

a) Bestimmung der vertikalen Kräfte unter der Annahme, dass das dritte Lager nicht vorhanden sei,

b) Ermittelung der horizontalen Kräfte, für den Fall, dass das kleine Lager am Kommutator wegfalle.

Mit Berücksichtigung mittlerer Verhältnisse verteilen sich die Kräfte angenähert wie folgt:

a) Riemenscheibe fliegend:

(39) Lagerdruck in $a =$

$$\sqrt{4700000\left(\frac{W}{n}\right)^{4/3} + 180000\left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

Lagerdruck in $b =$

$$\sqrt{1800000\left(\frac{W}{n}\right)^{4/3} + 6900\left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

Für kleinere Maschinen bis zu 10 Kilowatt giebt die Formel etwa 15 % zu grosse Lagerdrücke.

b) Riemenscheibe zwischen 2 Lagern:

(40) Lagerdruck in $a =$

$$\sqrt{\left(G \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}\right)^2 + \left(\frac{l_3}{l_3 + l_4} \cdot Z\right)^2} = \sqrt{2300000\left(\frac{W}{n}\right)^{4/3} + 82000\left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

Lagerdruck in $b =$

$$\sqrt{\left(G \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}\right)^2 + \left(\frac{l_4}{l_3 + l_4} \cdot Z\right)^2} = \sqrt{4000000\left(\frac{W}{n}\right)^{4/3} + 3300\left(\frac{W}{v}\right)^2}$$

(Vergleiche übrigens das Armaturgewicht in Kap. VIII.)

Aus dem Lagerdruck P, der Umfangsgeschwindigkeit v_1 der Welle in den Lagern und dem Reibungskoefficienten $f = 0{,}05$—$0{,}1$, berechnet sich dann der Reibungsverlust

(41) Reibungsverlust $= P \cdot v_1 \cdot f$ Kgm $= 9{,}81 \cdot P \cdot v_1 f$ Watt.

Beispiel. Wie gross ist der voraussichtliche Reibungsverlust einer Maschine von 40 Kilowatt und 700 Touren mit fliegender Riemenscheibe?

Riemengeschwindigkeit	$v =$	16,5 m;
Wellengeschwindigkeit	in $a =$	2,75 m;
„	in $b =$	2,00 m;
Reibungskoeffizient	$=$	0,067.

$$\text{Lagerdruck in } a = \sqrt{4\,700\,000\left(\frac{40}{700}\right)^{4/3} + 180\,000\left(\frac{40}{16{,}5}\right)^2} = 1070\text{ kg}$$

$$\text{do. in } b = \sqrt{1\,800\,000\left(\frac{40}{700}\right)^{4/3} + 6\,900\left(\frac{40}{16{,}5}\right)^2} = 282\text{ kg}$$

Wattverlust $= 9{,}81 \cdot 0{,}067\,(1070 \cdot 2{,}75 + 282 \cdot 2{,}0) = 2280$ Watt $= 5$ % der totalen Energie.

Zum Schlusse mag hier eine Tabelle der Lagerdrucke und Lagerdistanzen von 13 ausgeführten Maschinen von 110 Volt folgen, welche für eine erste Schätzung mit Vorteil benutzt werden kann.

[illegible]		2,4	[illegible]	[illegible]	13,7	18,2	26,4	35	49,5	68	82,5	99	133
[illegible]		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	700	620	570	520	450	420
[illegible]	Lager *A*	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	225	330	420	595	645	540	870
[illegible]	*B*	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	810	1115	1480	2030	2120	1545	2480
[illegible]	*C*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	920	1070
[illegible]	*A B*	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	925	1020	1075	1143	1260	1330	1475
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	275	215	375	350	475	505
[illegible]	[illegible]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	460	490

Bemerkung: *A* Lager am Kommutator,
B „ in der Mitte,
C Drittes Lager.
D Riemenscheibenmitte.

5. Nutzeffekt, Erwärmung.

Es seien

W die nützlichen Watt, bei Motoren = 736 × nützliche *PS*;
Σw die Summe sämtlicher Verluste, und zwar:
w_a = Wattverlust im Kupfer der Armatur,
w_h = „ durch Hysteresis,
w_f = „ „ Foucaultströme,
w_r = Reibungsverlust in Watt ausgedrückt,
w_m = Wattverlust in den Magneten = Magnetisierungsstrom² × Widerstand der Magnetwicklung;
ζ = der Nutzeffekt,

so ist

$$\zeta = \frac{W}{W + \Sigma w}$$

oder

(42)
$$\zeta = \frac{W}{W + w_a + w_h + w_f + w_r + w_m}$$

Es mag bei dieser Gelegenheit neuerdings an die, an die Besprechung der Foucaultströme geknüpften Bemerkungen erinnert werden.

Handelt es sich um eine sehr genaue Bestimmung des Nutzeffektes, so darf schliesslich auch die Bürstenreibung nicht ausser Acht gelassen werden; wenigstens bei Maschinen mit Kohlenbürsten.

Nach Versuchen von E. V. Cox und H. W. Buck (siehe E.T.Z., 5. November 1896) liessen sich folgende Reibungskoeffizienten konstatieren bei 5 m Umfangsgeschwindigkeit:

		trocken	geölt
Kohlenbürsten	radial aufliegend	1	0,3
„	tangent. „	0,64	0,2
Kupferbürsten	„ „	1,13(!)	0,32.

Dass der durch Bürstenreibung verursachte Verlust nicht immer zu vernachlässigen ist, mag folgendes Beispiel zeigen: Eine Dynamo von 100 Volt und 180 Ampère sei mit radial aufliegenden Kohlenbürsten versehen. Die Umfangsgeschwindigkeit betrage 9 m. Die Auflagfläche darf bei Kohlenbürsten nicht unter 12 mm² pro Ampère sein mit einem Bürstendrucke von ca. 0,15 kg pro cm².

Gesamtdruck an beiden Bürstenstiften ist daher gleich

$$2 \cdot \frac{180 \cdot 12}{100} \cdot 0{,}15 = 6{,}5 \, \text{kg}.$$

Reibungskoeffizient (Ölung vorausgesetzt)

$$0{,}3 \left(1 - \frac{9 - 5}{40}\right) = 0{,}27.$$

Folglich Reibungsverlust in Watt ausgedrückt

$$w = 9 \cdot 6{,}5 \cdot 0{,}27 \cdot 9{,}81 = 155 \text{ Watt} = 0{,}86\,\%.$$

Ist die Schmierung unvollständig, so kann auch dieser Verlust leicht doppelt so gross werden.

Jeder Verlust äussert sich durch Wärmeentwicklung, d. h. durch eine entsprechende Temperaturzunahme der von diesem Verluste betroffenen Maschinenteile. Die Leistung einer Gleichstrommaschine ist daher, abgesehen von mechanischen Bedingnissen, an die Wärmeausstrahlungsfähigkeit oder mit anderen Worten an die Oberfläche der Maschine gebunden.

Es ist leicht, aus Gleichung (42) den max. möglichen Nutzeffekt einer Maschine zu bestimmen. Wir brauchen nur W durch JE und w_a durch $J^2 R$ zu ersetzen (R = totaler Armaturwiderstand); ferner sei $w_h + w_f + w_r + w_m = w_\chi$ als konstant angenommen. Differenzieren wir diese Gleichung, so folgt

$$\zeta = \text{Maximum für } w_a = w_\chi$$

und der dem max. Nutzeffekt entsprechende Strom

$$J = \sqrt{\frac{w_\chi}{R}}.$$

Allgemein richtige Formeln über die Temperaturzunahme von Maschinen lassen sich leider keine aufstellen, wir begnügen uns daher mit den längst bekannten Formeln von W. B. Esson (siehe „Journal of the Institution of Electr. Eng., vol. XIX"), welche mit einiger Vorsicht angewandt nicht allzuweit vom Ziele schiessen:

a) Für Armaturen.

(43) $$\text{Erwärmung in C}^0 = \frac{225 \times \text{Wattverlust in der Armatur}}{\text{Abkühlungsfläche in cm}^2}.$$

b) Für Magnete.

(44) $$\text{Erwärmung in } C^0 = \frac{335 \times \text{Wattverlust pro Spule}}{\text{Oberfläche einer Spule in cm}^2}.$$

Hierbei ist zu bemerken, dass bei Armaturen im allgemeinen nur die äussern Mantel- und Seitenflächen zählen, bei kleinern Armaturen sogar nur die eine der letztern. Hat die Luft auch im Innern der Armatur Zutritt und ist der Durchmesser nicht zu klein, so kann noch ungefähr $^1/_3$ der innern Oberfläche dazu gerechnet werden.

Für die Magnete zählt die innere, gegen den Eisenkern gerichtete Fläche nicht mehr, wohl aber die Endflächen.

Beispiel. Der Durchmesser der fertigen Armatur einer 10 Kilowatt-Maschine sei gleich 24 cm, Länge = ca. 40 cm (über die Wicklung gemessen); ferner beträgt der Durchmesser der gegen das Pulley gerichteten Stirnfläche ca. 16 cm.

$$\text{Abkühlungsfläche} = 24 \,.\, \pi \,.\, 40 + \frac{16^2 \pi}{4} = 3200 \text{ cm}^2.$$

Verlust im Kupfer	= 260 Watt.	
„ durch Hysteresis	= 300 „	
	Total 560 Watt.	

Erwärmung nach Esson $= \frac{225 \,.\, 560}{3200} = 40^0$ C. über die Temperatur des Maschinenlokals; bei 20^0 C. im Maschinenhause nimmt die Armatur folglich ca. 60^0 C. an.

Die Formel (43) ist insofern nicht ganz korrekt, als der Armaturgeschwindigkeit nicht genügende Rechnung getragen ist.

Nach A. H. und C. E. Timmermann (Silv. P. Thompson, Dynamo-Electric Machinery, 5th Edition) beträgt die Anzahl Watt, welche per engl. Zoll Abkühlungsfläche ausgestrahlt werden kann:

bei	0 m	Geschwindigkeit	0,01	Watt per C^0
„	5 „	„	0,018	„ „ „
„	15 „	„	0,022	„ „ „

oder auf cm^2 bezogen, liesse sich dies angenähert durch die Formel ausdrücken:

(45) $$\text{Erwärmung in der Armatur} = \frac{645 \,.\, \text{Wattverlust}}{\text{Oberfläche } (1 + 0{,}3 \sqrt{v})} C^0.$$

v = Umfangsgeschwindigkeit in m per Sekunde.

Man betrachtet im allgemeinen eine Temperaturerhöhung von 40—45^0 C. gegenüber der Temperatur im Maschinenhaus, letztere zu 25^0 C. angenommen, als Normalie. Einige Konstrukteure gehen noch weiter, doch ist davon abzuraten, weil die Drahtisolation mit der Zeit spröde wird und nach einigen Jahren notwendigerweise zu Grunde gehen muss.

Bei guten Maschinen sollten daher ca.
8—9 cm^2 Abkühlungsfläche pro Watt in den Magneten und
5,5—6,5 cm^2 „ „ „ „ der Armatur vorgesehen werden.

Eine Ausnahme hiervon bilden Maschinen, welche für heisse Gegenden oder Schiffe bestimmt sind, wo die Temperatur des Lokales bis auf 40° C. steigen kann.

Besonders strenge ist in dieser Beziehung die englische Admiralität, welche eine maximale Temperaturerhöhung von 17° C. gestattet, was vielleicht etwas gar zu niedrig ist.

C. Umrechnung einer Armatur für andere Spannungen.

Die Gleichung (10)

$$E = \frac{n \,.\, \Phi \,.\, N}{60 \,.\, 10^8} \cdot \frac{p}{p^1}$$

zeigt, dass die Leistung einer Maschine durch Vergrösserung der Tourenzahl beliebig gesteigert werden kann. Die Maximalleistung ist daher an die Ausstrahlungsfähigkeit und die Temperaturzunahme gebunden, welche nach Gl. (43—45) ausgerechnet werden kann. Wir setzen hierbei voraus, dass die magnetischen Eigenschaften derart seien, dass die Maschine auch bei Überbelastung funkenlos läuft. Eine weitere Bedingung ist nun, dass die Umfangsgeschwindigkeit einen bestimmten Wert (25—30 m) nicht überschreitet. Zu bemerken ist hierbei, dass amerikanische Fabrikanten (z. B. die Westinghouse Co.) noch grössere Geschwindigkeiten als zulässig erachten.

Wird die Tourenzahl einer Maschine von bestimmter maximaler Leistung, gegeben durch die Abkühlungsfläche, vergrössert, so nimmt die Leistung nicht mehr proportional der Tourenzahl zu, sondern sie bleibt fast konstant; bei Maschinen mit reduzierter Tourenzahl stellt sich im Gegenteil ein kleiner Vorteil heraus. Immerhin kann jedoch die Stärke einer Maschine innerhalb den praktisch in Frage kommenden Grenzen als proportional der Tourenzahl betrachtet werden.

Diese Regel erleidet nur insofern eine kleine Beschränkung, als sich mit der Art der Wicklung auch häufig der Luftraum zwischen dem Armatureisen und den Polen ändert.

Wird der Luftabstand bei gleichbleibendem Φ für die neue Wicklung grösser, so kann nämlich leicht der Fall eintreten, dass der für die Magnetwicklung zur Verfügung stehende Wicklungsraum nicht mehr hinreicht, um die nötige Zahl Ampère-Windungen unterzubringen.

Anmerkung. Bei der Bezeichnung von Maschinentypen wird von den Fabrikanten gewöhnlich in der Weise verfahren, dass man für jeden Maschinentypen einen bestimmten Buchstaben als Kennzeichen annimmt und die Leistung in Watt, *PS* oder Ampère ausgedrückt dahinter setzt.

GD 50 kann z. B. eine Gleichstrommaschine von 50 Kilowatt,

WM 25 einen Wechselstrommotor von 25 *PS* bedeuten.

Diese Bezeichnung ist deshalb nicht vorteilhaft, weil sie wegen der Verschiedenheit der Tourenzahl keine direkte Beurteilung der Grösse gestattet. Viel logischer wäre es hierfür, die spezifische Leistung, d. h. die Leistung bei 1000 Touren (in Kilowatt) einzusetzen, wodurch die Übersicht und die Wahl eines bestimmten Types für eine abnorme Tourenzahl sehr erleichtert wird. Es mag dies an einem Beispiele gezeigt werden. Die Tabelle einer normalen Maschine sei wie folgt:

Nr.	1	2	3	4	5
Kilo-Watt	5	10	16	$24^1/_2$	33
Touren	1200	1000	800	700	600
Spec. Leistung in *KW* bei 1000 Touren	4	10	20	35	55

Hat man nun für einen bestimmten Zweck eine Maschine von, sagen wir, 20 *KW* und 400 Touren nötig, so entspricht dies $\frac{20 \,.\, 1000}{400} = 50$ *WK* spec. Leistung. Wir sehen sofort, dass hierfür der Type von 55 *KW* spec. Leistung als nächster zu nehmen ist und zwar wird diese Nummer voraussichtlich auch noch ausreichen, wenn die Spannung z. B. 200—300, statt 100 Volt normal ist.

E, J und n sollen die elektrischen Grössen der vorhandenen Maschinen sein, E_1, J_1 und n_1 diejenigen der umgeänderten.

Aus Gleichung (10) folgt für gleichbleibendes Φ

$$N_1 = N \,.\, \frac{E_1}{E} \,.\, \frac{n}{n_1} \,.$$

Wir berechnen nunmehr den Drahtquerschnitt nach Gleichung (28)

$$s_1 = \frac{\mathfrak{L} \,.\, N \,.\, J}{50 \,.\, e \,.\, 4 p_1{}^2}$$

oder

$$d = \frac{1}{12{,}5\, p_1} \sqrt{\frac{\mathfrak{L} \,.\, N \,.\, J}{e}} \,.$$

Für eine erste approximative Bestimmung des Drahtquerschnittes setzen wir allgemein

$$s = \frac{J}{i\, 2\, p_1} \,. \qquad (46)$$

in welcher Gleichung i die Drahtbeanspruchung in Ampère pro mm^2 zwischen 5—2 variiert und bis zu Strömen von 1500 Ampère mit ziemlich guter Übereinstimmung durch die Gleichung

$$(47) \qquad i = 90\,s$$

gegeben ist (siehe S. 74).

s variiert zwischen 0,06—0,02.

Ist die Zahl der Bürstenstifte bei beiden Maschinen die nämliche, so gilt für gleichen prozent. Voltverlust

$$\frac{s_1}{s} = \frac{J_1}{J}.$$

Gewöhnlich erweist sich jedoch in der Folge eine kleine Änderung in der Grösse des Voltverlustes $s \, . \, E = e$, sowie der totalen Induktion als notwendig, so dass die obige Formel nur als erste Annäherung zu betrachten ist.

Drähte und Drahtisolation. Ausser den runden Drähten sind auch viereckige Drähte und Drahtisolation im Gebrauch, doch empfiehlt sich deren Anwendung nicht, weil sie sehr schwer zu wickeln sind und die Isolation, die, nebenbei bemerkt, bei gleicher Zahl der Umspinnungen etwas mehr aufträgt, leicht leidet. Grössere Armaturen werden entweder mit Kupferbarren versehen oder mit Kabeln von beliebigem Querschnitt bewickelt. Um ein gutes Anliegen der Isolation zu sichern, ist es ratsam, auf alle Fälle die Kanten abzurunden. Kann man Kabeln einen Querschnitt, wie Fig. 61 *b* zeigt, geben, so ist dies für die Fabrikation des Kabels sehr angenehm und kostet etwas weniger. Das Kabel wird dann aus zwei runden Kabeln hergestellt und der Zwischenraum mit einzelnen Drähten ausgefüllt. Vorteilhaft ist es auch, wenn die gewünschte Form durch Flachwalzen eines runden Kabels erhalten werden kann. Die Benutzung von Kabeln statt Drähten hängt nicht nur von der leichten Ausführbarkeit der Wicklung ab, sondern sie ist bei glatten Armaturen mit grossen Stromstärken mit Rücksicht auf die Foucaultströme unter Umständen sogar vorgeschrieben.

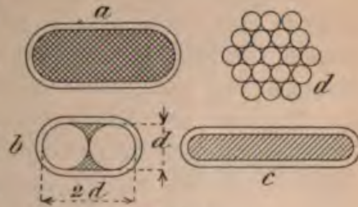


Fig. 61.

Kabel haben bei gleichem Durchmesser ca. 22—25 % weniger nutzbaren Querschnitt als ein voller Draht. Die Litzenzahl beträgt gewöhnlich 19 oder 37 (vergl. Kabeltab. III am Schlusse des Buches).

Die Dicke der Isolation hängt von der Anzahl der Umspinnungen und der Dicke der Umklöpplung ab. Letztere hat den Zweck, die Umspinnung gegen eine Verschiebung zu schützen und ist deshalb nur bei vollen Armaturdrähten oder bei Kabeln notwendig. Für Magnete genügt eine zwei- oder dreifache Umspinnung. Über die Dicke von

Baumwollumspinnungen mag die nachstehende Tabelle einige Anhaltspunkte geben.

Dicke des nackten Drahtes d	Garn Nr.	Dicke der Isolation b in mm		
		1 mal umsponnen	2 mal umsponnen	3 mal umsponnen
1 mm	70	0,25	0,50	0,65
	100	0,20	0,40	0,45
5 mm	70	0,25	0,40	0,55
	100	0,20	0,30	0,35

Eine Umklöpplung hat ungefähr $1^1/_2$ bis 2 fache Dicke einer Umspinnung. Bei Kabeln und viereckigen Drähten trägt die Isolation, wie bereits bemerkt, etwas mehr auf. Die obigen Zahlen sind also demgemäss etwas zu vergrössern. Ebenso ist ein kleiner Zuschlag vorzusehen, wenn die Drähte vor dem Wickeln schellackiert werden.

Beim Bestellen von beklöppelten Drähten sollte man immer verlangen, dass Beklöppelung und Umspinnung in einer Operation hergestellt werden. In der That wird auf diese Weise der Draht weniger verbogen und behält eher seine ursprüngliche Weichheit. Ferner sollen die Maschen der Umklöppelung sehr eng sein. Viele Fabrikanten imprägnieren die Isolation mit einer farblosen Gummilösung, wodurch erzielt wird, dass man an den Stellen, an denen der Draht blank sein muss, die Isolation wegschneiden kann, ohne dass dieselbe verfasert.

Ein ausgezeichnetes Mittel zum Imprägnieren des Drahtes ist der Schellack, ferner der hauptsächlich in Amerika unter dem Namen „Standard *B* Armature and Field Coil Varnish" bekannte schwarze Lack der Standard Paint Co. Diese beiden Substanzen erteilen der Isolation eine grössere Widerstandsfähigkeit gegen das Verkohlen, wie vom Verfasser angestellte, diesbezügliche Versuche zeigten. Ein mehrfach umsponnener und beklöppelter Draht wurde an verschiedenen Stellen teils mit Schellack, teils mit dem erwähnten amerikanischen Lack behandelt. Es zeigte sich, dass, während die nicht imprägnierten Stellen bei einer bestimmten Stromstärke schon verkohlt waren, die imprägnierten Teile vollständig intakt blieben.

Rechnungsbeispiel. Die elektrischen Daten einer Maschine von 4000 Ampère, 20 Volt und 220 Touren seien wie folgt:

Armaturdurchmesser	D = 97,9
Armaturlänge.	l = 60,0
Anzahl Drähte	N = 120
Anzahl Polpaare	p = 3
$\frac{1}{2}$ Zahl Bürstenstifte	p_1 = 3
Mittlere Länge einer Armaturwindung .	$\mathfrak{L}$ = 1,6 m

Armatur mit Zacken ausgeführt.

Diese Maschine ist für 700 Ampère und 120 Volt bei 250 Touren umzurechnen. Es ist hier einzuschalten, dass die ursprüngliche Maschine so schwach gesättigt war, dass wir ohne Bedenken auf die doppelte Sättigung gehen können.

Wir schreiben demzufolge

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{220}{250} \cdot \frac{120}{20} \cdot 120 = 320.$$

Lassen wir 4 % Spannungsverlust, d. h. 4,8 Volt im heissen Zustande zu, so wird der Drahtquerschnitt

$$s_1 = \frac{320 \,.\, 700 \,.\, 1{,}6 \,.\, 1{,}2}{60 \,.\, 4{,}8 \,.\, 4 \,.\, 9} = 41{,}5 \text{ mm}^2.$$

Dies ist ungefähr der Querschnitt eines Kabels von 8,2 mm Durchmesser nackt oder 8,9 mm isoliert. Führt man die Wicklung in 2 Lagen aus, so erhält man Nuten von ca. 10 mm Breite und ca. 20—21 mm Tiefe. Die Zacken werden etwas tiefer gemacht, als dies für die Unterbringung der Drähte notwendig wäre, um die Bandagen vertieft verlegen zu können. Der Durchmesser der fertigen Armatur ist dann gleich dem Eisendurchmesser.

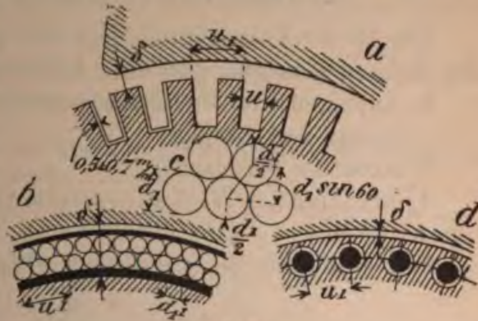


Fig. 62.

Kontrolle. Der Polbogen der Maschine beträgt 30 cm. Der Luftabstand 0,6 cm; die elektromotorische Kraft, d. h. die Bürstenspannung + dem Ohm'schen Verlust + dem Spannungsabfall durch die Armaturreaktion kann zu 130 Volt angenommen werden.

Hieraus ergiebt sich

$$B = \frac{130 \,.\, 60 \,.\, 10^8 \,.\, 3}{320 \,.\, 250 \,.\, 3} \cdot \frac{1}{60 \,.\, 30} = 5400.$$

Ferner nach Gleichung (26):

$$k_{max} = < \frac{20}{4\pi} \cdot \frac{5400 \,.\, 0{,}6}{30} = 173,$$

und aus den Daten der Maschine:

$$k = \frac{320 \,.\, 700}{2 \,.\, 3 \,.\, 97{,}9 \,.\, \pi} = 122$$

$$\frac{k_m}{k} = 1{,}42.$$

Luftabstand. Der Luftabstand glatter Armaturen setzt sich wie folgt zusammen:

1. Dicke der Isolation des Eisenkörpers (Papier, Tuch oder dgl.) ca. 1—2 mm.
2. Höhe der übereinander gelegten Drähte. Zweckmässigerweise werden die Drähte so übereinander gelegt, dass jeder Draht einer nachfolgenden Lage zwischen 2 Drähte der untern

zu liegen kommt. Für N_1 Lagen wird die totale Höhe $= d_1 + (N_1 - 1)\, d_1 \sin 60$. Gewöhnlich macht man nicht mehr als 2 Lagen, so dass $h = 1{,}9\, d_1$ wird.

3. Dicke der Bandagen 1,5—2 mm.
4. Eigentlicher Luftabstand zwischen der fertigen Armatur und den Polen 2—5 mm.

Für Zackenarmaturen gilt es als Regel,

$$\delta => 0{,}5\, u$$

zu machen (siehe Fig. 62).

D. Vorausberechnung einer neu zu konstruierenden Armatur.

Um bei der Vorausberechnung einer ganz neuen Maschine schnell zum Ziele zu gelangen, sind zwei Rechnungen erforderlich:

1. Approximative Bestimmung der Armaturdimensionen, Durchmesser und Länge,
2. Kontrolle derselben.

Approximative Vorausbestimmung der äussern Armaturdimensionen:

Wir gehen von der allgemeinen Gleichung (10) aus,

$$E = \frac{N \,.\, \Phi \,.\, n}{60 \,.\, 10^8} \cdot \frac{p}{p_1},$$

worin

$$N = \frac{k \,.\, 2 p_1 D \pi}{J}$$

und

$$\Phi = \frac{D \pi \beta l B}{2 p}$$

$$E = \frac{k \,.\, 2 p_1 D \pi}{J} \cdot \frac{D \pi \beta l B}{2 p} \cdot \frac{n p}{p_1\, 60 \,.\, 10^8}$$

(48) $$D = \sqrt{\frac{E J}{n}} \cdot \sqrt{\frac{60 \,.\, 10^8}{k \beta B \pi^2} \cdot \frac{1}{l}}.$$

Für eine erste approximative Bestimmung genügt es nun, folgende Annahmen zu machen:

Klemmenspannung $E_1 = 0{,}85\, E$
$k = 100$ für Ringarmaturen,
$= 150$ für Trommelarmaturen,
$B = 5600$
$\beta = 0{,}7.$

Die Gleichung (48) erhält dann folgende einfache Gestalt:

(49) $$D = 39 \sqrt{\frac{E_1 J}{n} \cdot \frac{1}{l}} \quad \text{für Ringwicklung,}$$

(50) $$D = 32 \sqrt{\frac{E_1 J}{n} \cdot \frac{1}{l}} \quad \text{für Trommelwicklung,}$$

oder $l = \lambda D$ gesetzt

(51) $$D = 11{,}5 \sqrt[3]{\frac{E_1 J}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}} \quad \text{für Ringwicklung,}$$

(52) $$D = 10 \sqrt[3]{\frac{E_1 J}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}} \quad \text{für Trommelwicklung.}$$

Diese Formeln stimmen beinahe exakt mit denjenigen von Albion Snell (Journ. of Electr. Eng. vol. XIX) überein.

In wieweit sie den praktischen Ausführungen entsprechen, mag aus nachfolgender Tabelle entnommen werden:

Nr.	$\frac{E_1 J}{n}$	λ	Berechnet		Ausgeführt		Bemerkung
			D	l	D	l	
			cm	cm	cm	cm	
1	1,92	0,89	13	11,5	18	16	2 polige Trommel.
2	10	1,12	20,7	23,2	24	27	2 polige Trommel.
3	22,2	0,79	30,4	24	31,6	25	2 polige Trommel.
4	57	0,78	41,8	32,6	41	32	4 „ „
5	100	0,67	61	41	60	40	2 „ Ring.
6	178	0,45	73,5	33	80	36	6 „ Trommel.
7	545	0,61	110	67	98	60	6 „ Ring.
8	660	0,48	111	53,5	115	55	4 „ Trommel.
9	2750	0,18	248	45	237	43	24 „ „
10	20000	0,34	390	132	320	110	12 „ „

Die Formeln geben, wie ersichtlich, nicht so üble Resultate für Maschinen von ca. 15 Kilowatt an bis zu 400 KW, für kleinere Maschinen muss der Durchmesser aus mechanischen Gründen grösser gewählt werden.

Ist der ungefähre Durchmesser und die Länge bezw. das Verhältnis $\lambda = \frac{l}{D}$ bekannt, so bestimmt man den Drahtquerschnitt, und zwar kann für eine erste Annäherungsrechnung mit Vorteil folgende Methode benutzt werden:

Die ungefähre Länge $\mathfrak{L}$ einer Windung (bei Trommeln diejenige Länge, welche auf einen Draht am Umfang nebst dessen Verbindungen auf einer Stirnfläche entfällt)

(53) $\mathfrak{L}$ in m $= 0{,}019\,(0{,}45\,D + l) = 0{,}019\,D\,(0{,}45 + \lambda)$

wenn D und l in cm gegeben sind.

Nach Gleichung (46) ist ferner

$$s = \frac{J}{2\,p_1\,.\,i} = \frac{\mathfrak{L}\,.\,N\,.\,J}{200\,.\,p_1^2\,.\,\varepsilon E}.$$

Setzt man in dieser Gleichung den Wert von N aus Gleichung (10) ein, wobei wir Φ durch $\frac{D\pi}{2p}\beta\,l\,B$ ersetzen, so folgt

(54) $$i = \frac{1{,}38\,\beta B\,.\,\lambda\,.\,D\,.\,n\varepsilon}{10^6\,(0{,}45 + \lambda)}.$$

Diese Formel lässt sich noch für Maschinen, deren Tourenzahl nicht allzusehr von den normalen abweicht, bedeutend vereinfachen.

$$\frac{\lambda\,D\,n}{(0{,}45 + \lambda)}$$

ist nämlich eine beinahe konstante Grösse und gleich 17500 im Mittel; bei langsam gehenden Dynamos und kleinem λ ist diese Zahl um 20 bis 30 % kleiner anzunehmen, bei grösseren Maschinen mit langer Armatur um ca. 20—30 % zu erhöhen.

Nimmt man ferner $\beta = 0{,}7$ und
$B = 5600$, so wird
$i = 90\,.\,\varepsilon$ (siehe Gl. 47).

(55) $$s = \frac{J}{p_1\,.\,180\,.\,\varepsilon}.$$

Genauere Bestimmung. Man zeichne nun einen kleinen Teil des Armaturumfanges in Naturgrösse oder vergrössertem Massstabe auf (siehe Fig. 62) und berechne die auf eine bestimmte Länge u_1 entfallende Zahl Drähte N'.

$$N = \frac{D\pi}{u_1}\,.\,N'.$$

Bei Zackenarmaturen wählt man gewöhnlich die Anzahl Nuten gleich der doppelten oder einfachen Anzahl Commutatorlamellen.

Um ein Umkehren der Pole zu verhindern, muss der Gleichung (24) Genüge geleistet werden, d. h.

$$N < 6{,}37\,.\,\frac{B_l\,.\,\delta\,.\,p\,.\,p_1}{J\beta} > \frac{D\pi}{u_1}\,.\,N'.$$

Bei dieser Gelegenheit unterlasse man es auch nicht, die Sättigung in den Zacken zu kontrollieren. Dieselbe darf nicht über 16—18000 bei 2poligen Maschinen sein. Bei mehrpoligen bleibe man womöglich unter 12—15000.

Durch entsprechende Modifikation von B, δ, β, N' und u_1, event. verbunden mit einer kleinen Änderung der Querschnittsform des Drahtes, wird es stets möglich sein, diese Bedingungen zu erfüllen.

Substituiert man noch den Wert Φ und $N = \frac{D\pi}{u_1} \cdot N'$ in Gleichung (10), so kann nunmehr mit ziemlicher Genauigkeit der Armaturdurchmesser nach der Formel

$$D = \sqrt{\frac{E p_1 \cdot u_1}{n N \beta l} \cdot \frac{120 \cdot 10^8}{\pi^2 \cdot B}} \tag{56}$$

berechnet werden. — Für E setze man die E.M.K., d. h. die Bürstenspannung + Ohm'scher Verlust + mutmasslicher Spannungsabfall infolge der Armaturreaktion.[1])

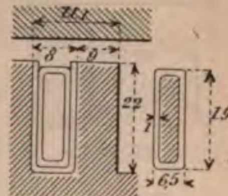


Fig. 63.

Kontrolle. Selbstverständlich ist am Schlusse dieses eine nachträgliche Kontrolle unerlässlich. Dieselbe betrifft in erster Linie den Drahtquerschnitt, der auf Grund der aus der Zeichnung entnommenen wirklichen Windungslänge genau festzustellen ist. Ferner hat man sich durch Aufzeichnen der Wicklung zu überzeugen, dass dieselbe auf den Stirnflächen u. s. w. Platz findet.

Der innere Armaturdurchmesser hängt bei Trommeln lediglich von Φ ab, bei Grammeringen dagegen muss vor allem aus die Plazierung der Drähte berücksichtigt werden. Es hat dies zur Folge, das besonders kleinere Ring-Maschinen einen verhältnismässig grossen Armaturdurchmesser erhalten.

Beispiel 1. Zu berechnen die Armatur einer 4poligen Trommelmaschine für 100 KW (125 Volt, 800 Amp.) bei 400 Touren.

$p_1 = 2$; $\lambda = 0{,}6$; $\varepsilon = 0{,}03$ (3 % Verlust); $\beta = 0{,}7$.

Nach Gleichung (52)

$$D = 10 \sqrt[3]{\frac{100000}{400} \cdot \frac{1}{0{,}6}} = 75 \text{ cm};$$

$$l = 0{,}6 \cdot 75 = 45 \text{ cm}.$$

[1]) Für die Armaturreaktion muss allerdings ein Anschlag gemacht werden, da diese Grösse leider jeder Berechnung spottet und auch überdies nicht zum voraus bekannt ist. Liegen keine Versuchsangaben über ähnliche Maschinen vor, so setze man den totalen Spannungsabfall gleich 2—3 mal dem Ohm'schen Verlust.

Nach Gleichung (55)

$$s = \frac{J}{p_1 \cdot 180 \cdot s} = \frac{800}{2 \cdot 180 \cdot 0{,}03} = 74 \text{ mm}^2 \text{ (siehe Fig. 63).}$$

Ferner nach Gleichung (24)

$$N = \frac{D\pi \cdot N'}{u_1} < 6{,}37 \cdot \frac{B\delta \cdot p_1 p}{J\beta}$$

oder

$$\frac{75 \cdot \pi \cdot 1}{1{,}7} < \frac{6{,}37 \cdot B \cdot \delta \cdot 2 \cdot 2}{800 \cdot 0{,}7}.$$

Würde man $B = 6000$, $\delta = 0{,}6$ cm machen, so erhält man
auf der linken Seite 138,
auf der rechten Seite 164, daher

$$\frac{k_m}{k} = 1{,}19.$$

Es sei ferner der totale Spannungsabfall zu 6 % angenommen, so ist die E.M.K. = 132 Volt, und wir finden nach Gleichung (56)

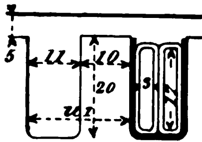


Fig. 64.

$$D = \sqrt{\frac{132 \cdot 2 \cdot 1{,}7}{1 \cdot 0{,}7 \cdot 45 \cdot 400} \cdot \frac{120 \cdot 10^8}{\pi^2 \cdot 6000}} = 84 \text{ cm.}$$

Der aus Formel (52) berechnete Armaturdurchmesser war folglich etwas zu klein.

Für diesen Durchmesser ist

$$\frac{k_m}{k} = 1{,}06.$$

Man erkennt daraus deutlich, dass die Anwendung von Zackenarmaturen durch die Leistung der Maschine begrenzt ist und von der Zahl der Pole abhängt.

Um nämlich eine Umkehrung der Magnetpole durch die Armaturreaktion zu verhüten, sind wir jetzt schon genötigt, den Luftabstand sehr gross zu nehmen. Dadurch geht aber der Vorteil der Zacken, welche doch eine Verringerung der Luftdistanz, d. h. eine Verringerung der Ampèrewindungen auf den Magneten bezweckt, verloren.

Die nämliche Maschine könnte fast ebensogut mit glatter Armatur bei etwelcher Vergrösserung der Polschuhe ausgeführt werden.

Um also den Vorteil der Zacken nicht zu verlieren, ist es am vorteilhaftesten, diese Maschine 6polig auszuführen.

Beispiel 2. Umrechnung der Maschine von Beispiel 1 für 6 Pole und 6 Bürsten.

Die Armaturlänge von 45 cm sei beibehalten.

$$s = \frac{800}{3 \cdot 180 \cdot 0{,}03} = \text{rund } 50 \text{ mm}^2.$$

$$\beta = 0{,}7$$

$$N = \frac{84 \cdot \pi \cdot 2}{2{,}1} < 6{,}37 \frac{B \cdot \delta \cdot 3 \cdot 3}{800 \cdot 0{,}7}$$

Angenommen $B = 5500$

$\delta = 0{,}5$

$$D = \sqrt{\frac{132 \cdot 3 \cdot 2{,}1}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 45 \cdot 400} \cdot \frac{120 \cdot 10^8}{\pi^2 \cdot 5500}} = 85 \text{ cm.}$$

Für diesen Durchmesser ist

$$\frac{k_m}{k} = 1{,}1.$$

Wir können dadurch, ganz abgesehen von den sonstigen Vorteilen der 6poligen Maschinen (geringeres Gewicht), an den für die Luft benötigten Ampère-Windungen ca. 24 % sparen.

Bestimmung des inneren Armaturdurchmessers.

Der innere Armaturdurchmesser wird dadurch gefunden, dass man, nachdem Φ aus den definitiven Dimensionen und der Bewicklung herausgerechnet wurde, versuchsweise verschiedene Annahmen für die Sättigung B_a im Armatureisen macht und auf bekannte Weise (Gleichung 34) den entsprechenden Wattverlust durch Hysteresis bestimmt. Annäherungsweise kann z. B. angenommen werden:

Für 2polige Maschinen $B_a = 14000—16000$,
„ 4 „ „ $B_a = 12000—14000$,
„ 6 „ „ $B_a = 9000—13000$.

Es mag hier auch beiläufig erwähnt werden, dass man bei Zackenarmaturen gewöhnlich nur den zwischen dem Fusskreis der Zacken und dem inneren Durchmesser enthaltenen Querschnitt als leitend betrachtet. Wenn daher in dem Nachstehenden von

$$\tau = \frac{D_1}{D'} = \frac{\text{Innerem Durchmesser}}{\text{Äusseren Durchmesser}}$$

die Rede ist, so ist unter D' stets der Durchmesser des Fusskreises verstanden.

Die direkte Berechnung von D_1 ist zwar ebenfalls nicht sehr einfach, sie führt aber mit Benutzung der am Schlusse des Buches enthaltenen Tabellen schneller zum Ziele.

Substituiert man in Gleichung (34) die Werte von

$$B = \frac{\Phi}{D'^2 (1 - \tau)\, 0{,}9\, \lambda}$$

und

$$V = \frac{D'^3 \pi}{4} (1 - \tau^2) \lambda \,.\, 0{,}9,$$

so erhält man die Formel

$$(57) \qquad \frac{(1-\tau)^{0,6}}{1+\tau} = \eta \frac{0{,}85}{10^7} \cdot \frac{\Phi^{1,6}}{D^{10,2}} \cdot \frac{1}{\lambda^{0,6}} \cdot \frac{\omega}{w_h} = A.$$

Man rechnet nun die rechte Seite dieser Gleichung aus, wobei die Tabelle VII benutzt werden kann, und sucht für den so erhaltenen

Wert von A in Tabelle VIII den Wert von τ **auf. Ziemlicl** nähert ist $\tau = 1 - A$.

Beispiel. Wie gross ist für die im vorigen Beispiel behandelte Maschine der innere Durchmesser zu machen, wenn der Wattverl (1,2%) betragen soll? Es sei $\eta = 0{,}003$ angenommen.

$$\Phi = \frac{132 \cdot 60 \cdot 10^8}{\frac{400 \cdot 85 \cdot \pi \cdot 2}{2{,}1}} = 7\,800\,000.$$

$$D' = 85 - 4 = 81.$$

$$\lambda = \frac{45}{85 - 4} = 0{,}55.$$

Num. 1,6 log. 7 800 000 = 10,65 . 1(

Num. 0,2 log. 81 = 2,41.

$\lambda^{0,6}$ (nach Tab. VIII) = 0,697.

$$\omega = \frac{400 \cdot 3}{60} = 20.$$

$$A = 0{,}003 \cdot \frac{0{,}85}{10^7} \cdot \frac{10{,}65 \cdot 10^{10}}{2{,}41} \cdot \frac{1}{0{,}697} \cdot \frac{20}{1200} = 0{,}269.$$

Die Tabelle giebt hierfür $\tau = 0{,}72$ an. (Durch Interpolation best Wir sehen, $\tau = 1 - A = 1 - 0{,}269$ ist gleich 0,731, stimmt also mit der Tabelle überein.

Wir berechnen hieraus

$$D_1 = 0{,}73 \cdot 81 = 59 \text{ cm}.$$

Bezeichnet man mit τ_1 das Verhältnis des inneren Armatu messers D_1 zum äusseren D über den Zacken gemessen, so find ungefähr folgende Ausführungen vor:

Zahl der Pole	τ_1
2	0,3 —0,4
4	0,6 —0,65
6	0,65—0,7
8	0,75—0,8
10	0,78—0,83
12	0,80—0,85
24	0,9

Diese Zahlen sind ausgeführten Maschinen von 2—2000 H nommen, und zwar beziehen sich die grösseren τ_1 auf grössere messer.

Im vorigen Beispiele einer 6poligen Maschine war

$$D = 85 \text{ cm}; \; D_1 = 59$$

$$\frac{D_1}{D} = \frac{59}{85} = \text{rund } 0{,}7;$$

die Übereinstimmung mit der Tabelle ist also eine ziemlich gu

Zum Schlusse folgt noch eine Tabelle ausgeführter Armaturen der verschiedensten Fabrikate. Dieselbe hat nicht etwa den Zweck, als Vorlage für die Konstruktion von Dynamos benutzt zu werden. Obwohl ein grosser Teil dieser Maschinen entschieden gut funktionieren mag, wofür schon der Name der Fabrikanten eine gewisse Garantie bietet, so dürften sich zweifelsohne darunter Maschinen vorfinden, welche verbesserungsfähig sind. Die Tabelle soll daher auch lediglich als Hilfsmittel zur schnellen Bestimmung von ungefähren Dimensionen und zur Vergleichung dienen. Wer jedoch zu berechnen versteht, wird daraus noch verschiedene andere interessante Schlüsse ziehen können.

Tabelle ausgeführter Armatu

Nr.	Spec. Leistung KW	Normal-Leistung	Volt	Touren	p	p_1	Armatur D cm	l cm	N	Draht
1	0,42	1 PS	110	1750	1	1	13,3	13,3	768	—
2	0,75	1,5 KW	100	2000	1	1	15	15,6	200	1,8
3	1,92	2,5 „	125	1300	1	1	18	16	400	1,6
4	2,4	5 PS	110	1550	1	1	20,9	20,4	348	—
5	4,16	5 KW	110	1200	1	1	20	20	228	2,5
6	5,35	7,5 „	100	1400	1	1	27,6	28	165	3,8
7	5,4	10 PS	220	1360	1	1	23,5	23,4	576	—
8	11	20 „	220	1350	1	1	29,6	29	320	—
9	15,6	14 KW	125	900	1	1	30	26	180	4
10	25	20 „	100	800	1	1	42	42	144	19Drähte à
11	27	21 „	105	780	1	1	28,2	19	120	30 m/m²
12	30	225 „	150	750	2	2	42	32	296	3,8
13	38	35 PS	440	675	1	1	38,4	36,2	464	—
14	57	40 KW	125	700	2	1	41	32	122	3 × 18
15	63	30 PS	500	350	2	1	29,5	38	760	No. 11 B u
16	66,6	40 KW	100	600	1	1	51,4	40	80	9,2
17	83	50 „	125	600	2	2	56	36	224	2 × 16
18	83,4	50 „	125	600	2	2	58	27	210	—
19	100	60 „	110	600	2	2	50	38	160	6 × 6
20	114	75 PS	440	675	1	1	50	47	38,8	—
21	120	60 KW	120	500	1	1	62,2	40	140	22 × 4
22	144	72 „	120	500	3	3	60	20	360	4 × 5
23	148	74 „	530	500	3	1	80	33	400	1 × 25
24	154	100 „	550	650	2	2	63,6	43	290	3,6 × 7
25	160	72 „	125	450	2	2	63	44	176	3 × 18
26	330	66 „	200	110	2	2	105	31	516	—
27	666	200 „	530	300	2	2	115	55	488	1,6 × 18
28	900	360 „	600	400	2	2	122	63,5	360	—
29	1 340	200 „	550	150	3	1	150	37	616	5,1 × 17
30	2 740	410 „	55	150	12	12	237	43	432	19Drähte à
31	5 900	624 „	240	105	9	9	322	31	1440	4,2 × 7
32	20 000	1500 „	550	75	6	6	320	ca. 110	1392	6,35 × 19
33	39 000	3000 „	550	77	24	24	396	„ 57	2376	—

rschiedener Systeme.

Kommutator		δ cm	Φ	Bemerkungen
N_2	Länge cm			
24	—	—	489 000	Sprague (Manchestertype).
40	4	0,14	1 570 000	Alter Type Oerlikon (Manchestertype).
50	5	0,35	16 500 000	Oerlikon.
58	—	—	1 228 000	Sprague.
38	8	—	2 560 000	Elekt. Aktienges. vorm. Lahmeyer.
55	6	0,175	2 800 000	Alter Type Oerlikon.
48	—	—	1 800 000	Sprague.
80	—	—	2 974 000	„
45	15 *k*	0,5	5 000 000	J. Farcot.
72	13	0,10	5 700 000	Alter Type Oerlikon.
60	—	1,05	7 153 000	Gisb. Kapp.
148	10	1	4 160 000	Elektr. Akt. Ges. vorm. Schluckert & Cie
58	—	—	8 517 000	Sprague.
61	16,4	0,6	4 750 000	Oerlikon.
95	7,5	0,555	5 200 000	Westinghouse Co. (Trammotor).
40	21	—	13 800 000	Alter Type Oerlikon.
112	—	0,75	6 000 000	J. Farcot.
105	14,5	—	6 400 000	General Electr. Co.
80	18,5	—	7 500 000	Schuckert.
97	—	—	13 430 000	Sprague.
70	22	0,5	11 000 000	Alter Type Oerlikon.
180	17	1	4 120 000	Gebr. Naglo.
200	12	—	5 700 000	Alioth, Basel.
145	14	1	9 000 000	Union Elektr. Gesellschaft.
88	18	0,8	10 000 000	Oerlikon.
516	34	—	22 600 000	Siemens & Halske.
244	23	1,0	23 400 000	Oerlikon.
180	38	—	27 000 000	General Electr. Co.
308	18	1	12 900 000	Union Elektr. Gesellschaft.
216	35	2,45	5 600 000	Oerlikon.
720	22	1	11 080 000	Allgem. Elektrizitätsgesellschaft.
696	50,4	0,635	35 000 000	General Electr. Co.
1188	—	1,4	19 000 000	Walker Co.

III. Berechnung der Magnete.

A. Charakteristische Eigenschaften der verschiedenen Magnetschaltungen.

Das einfachste Mittel, um über die Vorgänge in einer Dynamo eine leichte Übersicht zu gewinnen, besteht darin, dass wir ihre **Charakteristik** aufzeichnen, ein graphisches Verfahren, das zuerst von Faraday angewendet wurde und nachher allgemeine Verbreitung fand.

Überhaupt sollte man niemals versäumen, alle Versuchsresultate graphisch aufzuzeichnen, weil es nur dadurch möglich ist, die Richtigkeit der Versuchsdaten zu kontrollieren, und die unvermeidlichen Beobachtungsfehler von den zuverlässigen Angaben auszuscheiden. Man benützt hierzu das gewöhnliche Koordinatensystem; je nach den Grössen, die mit einander verglichen werden sollen, — Erregung mit Spannung, Spannung mit Tourenzahl u. s. w. — trägt man die Spannungen als Ordinaten, die entsprechenden Ampère-Windungen (oder auch bloss Ampère) resp. die Tourenzahlen als Abscissen auf.

Wenn auch unter Charakteristik in engeren Sinne nur diejenigen Kurven gemeint sind, welche die den verschiedenen Magnetwicklungsarten eigentümlichen Erscheinungen charakterisieren, z. B. jene, welche erhalten werden, wenn man Armaturstromstärke mit E.M.K vergleicht, so wird diese Bezeichnung auch häufig auf die Kurven im allgemeinen übertragen.

Unter solchen ist weitaus die wichtigste jene, welche sich aus einer Vergleichung von magneto-motorischer Kraft ($\mathfrak{J}\,m$) mit Spannung ergiebt. Man kann sie Magnetisierungskurve nennen.[1]) Sie ist deshalb von Bedeutung, weil sich aus ihr jederzeit mit Leichtigkeit die übrigen Kurven herauskonstruieren lassen.

---

[1]) Für Serienmaschinen ist sie auch Charakteristik.

Statt mit den Ordinaten die externen oder internen Spannungen zu bezeichnen, empfiehlt es sich stets, die mittels Gleichung (10) ausgerechnete totale Induktion Φ zu setzen. Dadurch machen wir uns gleichzeitig von der Tourenzahl, sowie der Drahtzahl auf der Armatur unabhängig, eine Vereinfachung, die uns bei den nachstehenden Berechnungen öfters zu statten kommt.

Fig. 65 stellt eine solche Magnetisierungskurve einer beliebigen separat erregten Maschine mit stromlosem Anker dar; wir ersehen daraus, dass der erste Teil angenähert eine Gerade ist, die sich, in einem gewissen Punkte angekommen, rasch abbiegt, um in eine schwach gegen die Abscissenaxe geneigte Gerade zu verlaufen, d. h. die Kraftlinienzahl nimmt anfänglich ziemlich proportional den erregenden Ampère-Windungen zu, nähert sich aber nachher mehr und mehr einem maximalen Werte. Eine gute Beleuchtungs-Maschine darf weder zu schwach, noch zu stark gesättigt sein. Das erstere ist deshalb schädlich, weil die Spannung dadurch zu wenig stabil wird und bei der geringsten Tourenänderung bedeutende Schwankungen entstehen. Der Nachteil der zu stark gesättigten Maschinen liegt nur im Preise. Um den Preis nicht zu stark zu erhöhen und andererseit den erst genannten Übelstand zu umgehen, sollte folgende Regel beobachtet werden:

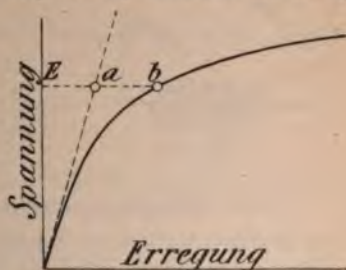


Fig. 65.

Verlängert man den ersten geraden Teil der Charakteristik (Fig. 65) bis zum Schnittpunkte mit der im Abstande E (E.M.K.) parallel zur Abscissenaxe gezogenen Geraden Eb, so sollte das Stück ab ungefähr gleich Ea sein, wenn immer möglich aber nicht kleiner als Ea sein.

Diese Regel kann, wie sich später zeigen wird, auch folgendermassen ausgedrückt werden: Die totale Zahl Ampère-Windungen pro magnetischen Stromkreis sollte mindestens doppelt so gross als diejenigen des doppelten Luftabstandes sein.

Eine Ausnahme von dieser Regel bilden Bogenlichtmaschinen und Seriemotoren die möglichst stark gesättigt sein sollen, wie wir später sehen werden.

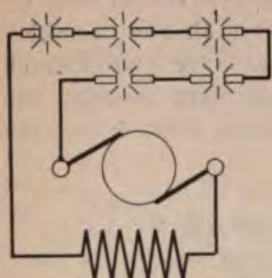
Die Serienmaschine.

Wie aus Fig. 66 ersichtlich ist, wird bei der Serienmaschine der gesamte elektrische Strom zur Erregung der Magnete benützt, eine Verminderung des äusseren Widerstandes hätte somit nach dem Ohm-

schen Gesetz sofort auch eine Vergrösserung der Stromstärke und mit ihr als Wirkung der vermehrten Erregung ein Steigen der Spannung zur Folge. Es ist dies ein Grund, warum derartige Maschinen nicht zur Beleuchtung mit Glühlampen von konstanter Spannung dienen, während sie für Beleuchtungen mit Bogenlampen oder Glühlampen in Serie sehr geeignet sind.

Dabei ist aber erforderlich, dass die Maschine eine konstante Stromstärke beibehalte, während sich die Spannung je nach der Zahl der hintereinander geschalteten Lampen — die sich fortwährend ändert — zu richten hat.

Die Methoden, deren man sich zur Erreichung dieses Zweckes bedient, sind verschiedenartig, lassen sich aber im allgemeinen in die nachstehenden 3 Gruppen einteilen:


Fig. 66.

1. Regulierung der Spannung durch Änderung des magnetischen Feldes.
2. Regulierung durch Verschiebung der Bürsten; erfordert Maschinen mit geringer Armaturreaktion und grosser Zahl Kommutatorlamellen, weil sonst die Funkenbildung zu gross wird.
3. Regulierung der Tourenzahl.

Vom ökonomischen Standpunkt aus müsste der letzteren der Vorzug gegeben werden, es scheint jedoch, dass diese Methode in der Praxis wenig Anwendung gefunden hat. Ich verweise hierüber auf einen sehr interessanten Vortrag von A. Bernstein, gehalten am 22. Okt. 1889 im Elektrotechn. Verein in Berlin. (Siehe Elektrotechn. Zeitschrift, Nov. 1889.)

A. Bernstein zeigte, dass bei einer Beleuchtungsanlage mit in Serie geschalteten Lampen, die ihren Strom von einer Seriemaschine erhalten, eine konstante Stromstärke dadurch erreicht werden kann, dass man den Dampfmaschinenregulator aushängt. Da nämlich die Dampfmaschine auf konstanten Kolbendruck arbeitet, so tritt beim Ausschalten von Lampen folgende Erscheinung ein: Zunächst nimmt der Widerstand des Stromkreises ab; bei der vorhandenen Spannung würde also die Stromstärke zunehmen, mithin auch die aufzuwendende Energie. Die Dampfmaschine muss also notwendigerweise langsamer laufen und zwar ist ein Gleichgewichtszustand nur für gleiche Stromstärke erreichbar.

Die Seriemaschine als Beleuchtungsmaschine für hintereinander geschaltete Bogenlampen bildet den Gegenstand eines besonderen Kapitels. Wir wollen nun in dem nachstehenden untersuchen, wie sich

die Seriemaschine bei Kraftübertragungen verhält. Speziell interessiert es uns, die Bedingungen kennen zu lernen, unter welchen eine Konstanz der Tourenzahl der Sekundär-Maschine bei variabler Belastung erreichbar ist.

Die interne Spannung der Primärmaschine ist nach früherem durch die Formel gegeben

$$E = \frac{n \, \Phi \, N}{60 \, . \, 10^8} \cdot \frac{p}{p_1},$$

wofür wir der Einfachheit halber setzen

$$E = c \, . \, n \, . \, f(J\,m).$$

Bedeutet R die Summe der Widerstände in der primären und sekundären Maschine (Armatur und Magnet), sowie in der Leitung, so haben wir in der sekundären Maschine noch eine wirksame Spannung zur Verfügung

$$E_1 = E - J\,R = c \, . \, n \, . \, f(J\,m) - J\,R$$

oder, da E_1 auch mit $c_1 \, . \, n_1 \, . \, f(J\,m')$ geschrieben werden kann, bestimmt sich die Tourenzahl der Sekundär-Dynamo

$$n_1 = \frac{E_1}{c_1 \, . \, f(J\,m')} = \frac{c \, . \, n \, . \, f(J\,m)}{c_1 \, . \, f(J\,m')} - \frac{J\,R}{c_1 \, . \, f(J\,m')}. \tag{58}$$

Der einfachste Fall wäre nun der, wo beide Maschinen in Konstruktion und Bewicklung vollständig gleich sind, d. h.

$$c_1 = c; \; m' = m; \; f(J\,m') = f(J\,m);$$

ferner sollen beide Maschinen mit einem Sättigungsgrade betrieben werden, der noch im geraden Teile unserer Kurve Fig. 65 verläuft, so lässt sich $f(J\,m')$ auch mit $c_2 \, . \, J$ schreiben, die Gleichung (58) erhält somit die nachstehende Form

$$n_1 = n - \frac{R}{c_1 \, . \, c_2} = n - c_3, \tag{59}$$

das heisst die Sekundärmaschine müsste theoretisch, sofern die Primärmaschine eine konstante Tourenzahl n besitzt, auch bei verschiedener Belastung innerhalb des geraden Teiles der Charakteristik mit einer konstanten Tourenzahl arbeiten. In Wirklichkeit wird dies jedoch nicht immer zutreffen, weil die Rückwirkung des Armaturstromes auf das magnetische Feld, wie wir später sehen werden, unter gewissen Umständen eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung annehmen kann, und zwar sucht sie bei der Primärmaschine das magnetische Feld zu schwächen, während sie dasselbe bei der Sekundärmaschine verstärkt. Die Gesamtwirkung bei der Armaturreaktion in Generator und Motor zusammen ist also nicht etwa gleich Null, son-

dern sie summiert sich. Man wird daher immer gut thun, auf die Magnete des Generators eine kleine Additionalwicklung zu bringen, während man die Spulen des Motors um den gleichen Betrag vermindert. Zudem muss natürlich vor allem auch darauf gesehen werden, die Ursache dieser Reaktionen durch geeignete Konstruktion (siehe Abschnitt VI) auf das zulässige Mass zu reduzieren.

Sollen beide Maschinen mit der gleichen Tourenzahl laufen, so hat dies nur eine Modifikation der Konstanten c und c_1 zur Folge. Es ist nämlich für diesen Fall

$$n_1 = \frac{c}{c_1} \cdot n - \frac{R}{c_1 \cdot c_2}$$

$$n_1 = n.$$

Hieraus folgt

$$n = \frac{c}{c_1} \cdot n - \frac{R}{c_1 \cdot c_2}$$

oder

$$c_1 = \left(c \,.\, n - \frac{R}{c_2}\right) \cdot \frac{1}{n}.$$

Die abgeleiteteten Formeln gelten, wie bereits bemerkt, nur für die Annahme, dass beide Maschinen noch im geraden Teile ihrer Charakteristik betrieben werden. Setzen wir nun den, der praktischen Ausführung näher tretenden Fall, dass zwar Sekundär- wie Primärmaschine von gleicher Konstruktion und Bewicklung seien, hingegen mit einem höheren Sättigungsgrade laufen, so wird Gleichung (59) zu

$$(60) \qquad n_1 = n - \frac{J R}{c \,.\, f'(J m')}.$$

Der Zähler des zweiten Gliedes nimmt genau proportional der Stromentnahme zu, während uns ein Vergleich mit der Kurve 65 lehrt, dass die $f'(Jm')$ nicht mehr im Verhältnisse zur Stromstärke J wächst, der Bruch ist daher auch nicht mehr konstant, sondern nimmt mit vergrössertem J langsam zu, d. h. die Sekundärmaschine wird bei verstärkter Belastung mit accellerierender Tourenverminderung laufen.

Es erübrigt noch zu zeigen, wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn Motor und Generator sowohl hinsichtlich Form, als auch im Sättigungsgrade verschieden sind.

Die Gleichung $E_1 = E - JR$ lässt sich leicht graphisch darstellen, indem wir die interne Charakteristik der Primärmaschine sowie die Gerade JR aufzeichnen. Da uns indessen der Spannungsverlust in der Sekundärmaschine vor der Hand noch unbekannt ist, so legen wir unseren Berechnungen einen mutmasslichen Verlust zu Grunde, den wir bei der nachträglichen Dimensionierung des Drahtes womöglich zu er-

reichen suchen, wobei es bei relativ grossem Leitungsverluste ohne wesentlichen Einfluss auf das Resultat bleibt, wenn auch der später gefundene wirkliche Verlust nicht ganz genau mit unserer Annahme übereinstimmt.

Anmerkung. Um dem Einfluss der Armaturreaktion, deren Berechnung äusserst umständlich ist, zu begegnen, wird es in den meisten Fällen genügen, den Ohm'schen Verlust doppelt in die Rechnung einzusetzen.

Die Differenz aus den Ordinatenwerten der primären Charakteristik, vermindert um die entsprechenden Grössen JR, ergiebt nun eine neue Kurve, nämlich die sekundäre Charakteristik (siehe Fig. 67).

Die sekundäre Maschine berechnet sich folglich in ganz gleicher Weise wie die primäre Maschine, nur ist ihre Anordnung derart zu treffen, dass die Ordinaten der sekundären Charakteristik und diejenigen der gefundenen Kurve III für die gleiche magnetisierende Stromstärke (nicht Ampère-Windungen) genau miteinander übereinstimmen. Ein oberflächlicher Vergleich der beiden Kurven I und III lässt sofort erkennen, dass eine Konstanz der sekundären Tourenzahl auch in den höheren Sättigungsgraden nur dann denkbar ist, wenn die Sekundärmaschine durchschnittlich mit einem höheren Sättigungsgrade, als die Primärdynamo arbeitet, ein günstiger Faktor, der uns möglich macht, die Dimensionen des Motors etwas kleiner zu halten.

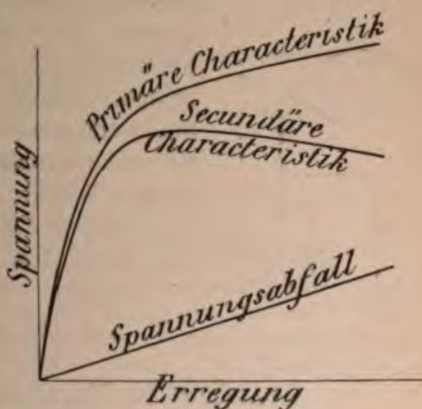


Fig. 67.

Wo die Variationen in der Belastung nicht wesentliche sind, ist es natürlich auch nur erforderlich, dass die sekundäre Charakteristik in denjenigen Punkten mit der Kurve III übereinstimme, innerhalb welcher sich die Schwankungen in der Arbeitentnahme vollziehen, während sie in den übrigen Teilen einen ganz anderen Verlauf nehmen kann.

Im übrigen darf die sekundäre Charakteristik aber auch nicht zu stark gekrümmt sein, weil eine derartige Form nur mit Zuhilfenahme einer starken Armaturreaktion erreichbar ist, die sehr leicht eine starke Funkenbildung zur Folge haben kann.

Die Nebenschluss-Maschine oder Shunt-Maschine.

(Siehe Fig. 68.)

Der Strom, welcher durch die Magnetwicklungen fliesst, ist nach dem Ohm'schen Gesetze

$$\mathfrak{J} = \frac{E}{R}$$

R = Widerstand der zwischen 2 Bürsten hintereinander geschalteten Magnetwicklungen.

Da hier der Erregerstrom ziemlich unabhängig vom äusseren Stromkreise ist, so wird natürlich auch die Bürstenspannung, abgesehen vom Spannungsverluste in der Armatur und dem Spannungsabfall infolge der Armaturreaktion bei konstanter Tourenzahl viel weniger veränderlich sein, ein Umstand, welcher die Nebenschlussmaschine besonders für Beleuchtungen mit verhältnismässig kleinem Leitungs-Widerstande geeignet macht.

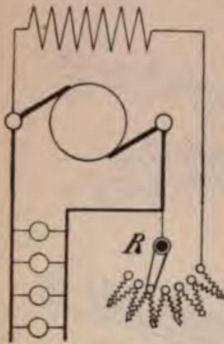


Fig. 68.

Über die Berechnung der Nebenschlusswicklung merke man sich vorläufig folgendes:

Es sei

$\mathfrak{J}m$ die pro Magnetspule erforderliche Anzahl Ampère-Windungen,
s Querschnitt des Magnetdrahtes,
$\mathfrak{L}$ mittlere Länge einer Magnetwindung,
E Spannung an den Klemmen der Magnetwicklung,
m Anzahl Windungen pro Spule,
m_1 Zahl der hintereinander geschalteten Magnetspulen,
J totaler Maschinenstrom, und
$\mathfrak{J} = \varepsilon J$ Strom, welcher durch die Magnete fliesst ($100 \cdot \varepsilon$ = % Verlust), so ist

$$\mathfrak{J} = \frac{E}{R} = \frac{E}{m \cdot m_1 \cdot \frac{\mathfrak{L}}{60 \cdot s}}.$$

Hieraus berechnet sich s, das jedoch mit Rücksicht auf die Widerstandszunahme mit der Temperatur ca. 20 % grösser anzunehmen ist.

(61) $$s = \frac{(\mathfrak{J}m)\, m_1 \cdot \mathfrak{L}}{E \cdot 50}.$$

Die Formel gilt auch für Seriemaschinen (E = Spannungsverlust).

Da ferner $\mathfrak{J} = s \cdot i$ ist, so kann auch geschrieben werden:

(62) $$m\, m_1 \cdot \mathfrak{L} = \frac{E \cdot 50}{i}.$$

Die linke Seite bedeutet die totale Drahtlänge.

$\mathfrak{I}m$ steht für die Anzahl Ampère-Windungen pro Magnet, ist somit eine zum voraus bekannte Grösse, desgleichen auch E, die Bürstenspannung; $\mathfrak{L}$ ergiebt sich aus der Konstruktion der Maschine und muss schätzungsweise angenommen werden. Da es sich im Interesse nicht zu dünner Drähte empfiehlt, sämtliche Spulen hintereinander zu schalten, wodurch m_1 = der Anzahl Spulen überhaupt wird, so erhält s einen für jede Maschine ganz bestimmten. von der Stromstärke in den Magneten unabhängigen Wert; es ist daher nur noch m, die Anzahl Windungen pro Spule zu bestimmen.

(63)
$$m = \frac{\mathfrak{I}m}{\varepsilon \, . \, J} = \frac{\mathfrak{I}m}{\mathfrak{I}}.$$

Beispiel 1. Eine kleine Maschine von 25 Volt Klemmenspannung bedürfe zur Erregung pro Magnetspule 2500 Ampère-Windungen. Die mittlere Länge einer Windung sei annahmsweise $\mathfrak{L} = 0{,}64$ m, da beide Spulen in Serie geschaltet sind, ist somit $m_1 = 2$.

Wie gross ist der Drahtdurchmesser?

Nach Gleichung (61) ist

$$s = \frac{\mathfrak{I}m \, . \, m_1 \, \mathfrak{L}}{E \, . \, 50} = \frac{2500 \, . \, 2 \, . \, 0{,}64}{25 \, . \, 50} = 2{,}56 \text{ mm}^2.$$

Drahtdurchmesser nach Tabelle II (am Schlusse des Buches) gleich 1,8 mm.

Beispiel 2. Für eine 2 polige Maschine von 250 Ampère und 5 Volt ist die Nebenschlusswicklung derart zu bestimmen, dass man durch den Nebenschluss einen Stromverlust von ca. 7% hat. Wie sind die Anordnungen zu treffen?

$\mathfrak{I}m$ sei $= 4300$

$\mathfrak{L} = 0{,}5$ m.

Da beide Magnetspulen in Serie geschaltet werden, ist $m_1 = 2$.

Nach Gleichung (61) ist

$$s = \frac{\mathfrak{I}m \, . \, m_1 \, . \, \mathfrak{L}}{E \, . \, 50} = \frac{4300 \, . \, 2 \, . \, 0{,}5}{5 \, . \, 50} = 17{,}2 \text{ mm}^2.$$

Ferner nach Gleichung (63)

$$m = \frac{\mathfrak{I}m}{\varepsilon \, . \, J} = \frac{4300}{0{,}07 \, . \, 250} = 246 \text{ Windungen pro Magnet.}$$

Im Anschlusse an das Gesagte liesse sich noch die Frage aufwerfen: Welcher Effekt wird erzielt, wenn wir beispielsweise bei einer 2poligen Lichtmaschine die beiden Magnetspulen nebeneinander statt hintereinander schalten?

Eine Lösung ist unschwer zu finden:

Bezeichnen wir mit r den Widerstand einer einzelnen Magnetspule, so ist

für Hintereinanderschaltung $R = 2 \, . \, r$,

„ Nebeneinanderschaltung $R = \frac{r}{2}$.

Der totale, durch die Magnete fliessende Strom würde somit $\frac{2 \cdot r}{\frac{r}{2}} = 4$mal so gross als im vorigen Falle, oder, da durch jede Magnetwicklung die Hälfte dieses totalen Stromes fliesst, so ergeben sich als resultierende

$$\text{Ampère-Windungen} = \frac{4 \cdot \mathfrak{J}}{2} \cdot m = 2 \cdot \mathfrak{J} m.$$

Eine Anwendung hiervon mag unter Umständen als Notbehelf dann gemacht werden, wenn die Maschine beim Versuche zu wenig Spannung giebt. Es ist dies jedoch immerhin ein bedenklicher Trost und heisst es deshalb bei der Berechnung von Nebenschlusswicklungen doppelt achtgeben, weil ein Auf- und Abwickeln von Magnetwicklungen zu keinem Resultate führt. Dagegen kann einer allfälligen Erwärmung der Magnete dadurch abgeholfen werden, dass man mehr Windungen auf die Spulen bringt.

Anmerkung. Zum Laden von Akkumulatoren werden fast ausschliesslich Nebenschlussmaschinen verwendet. Hierbei empfiehlt es sich, in den Hauptstrom einen automatischen Minimalstrom-Ausschalter anzubringen, welcher, sobald der aus der Maschine kommende Strom unter ein gewisses Minimum sinkt, einfach die Verbindung zwischen Maschine und Akkumulatoren unterbricht.

Die Vorteile eines solchen Apparates werden aus einem Beispiele klar: Nehmen wir an, der die Dynamo antreibende Riemen gleite irgend einer Ursache wegen von der Riemenscheibe herunter, so erhält die Maschine sofort von den Akkumulatoren aus Strom. Befindet sich die Armatur noch in rascher Bewegung, so hat dies nichts zu sagen, indem sie einfach als Motor in der gleichen Richtung weiter getrieben wird. Ist dies jedoch nicht der Fall, was noch wahrscheinlicher ist, so wird die Akkumulatorenbatterie durch den im ruhenden Zustande äusserst geringen Widerstand der Armatur kurz geschlossen und der Zerstörung ausgesetzt. Letzterem kann zwar durch Anbringung von Bleisicherungen vorgebeugt werden; dagegen kann manchmal nicht vermieden werden, dass sich die Pole umkehren, wie ich schon öfters bei Maschinen von dem bekannten Manchester-Type beobachtete. Es scheint dies zwar im Widerspruche mit der Theorie der Nebenschlussmaschine zu stehen, weil der Magnetstrom in beiden Fällen die gleiche Richtung hat.

Eine Erklärung ist offenbar darin zu suchen, dass bei Kurzschluss der Batterie durch die Maschine die Armaturreaktion, welche entgegengesetzte Richtung zum Magnetfelde hat, ungemein stark anwächst. Da überdies der Magnetstrom schon infolge der Verminderung der Spannung abnimmt, verschwindet schliesslich das Feld vollständig, resp. es wird durch den überwiegenden Armaturstrom umgekehrt.

Die Benutzung einer einzelnen Maschine zum Laden von Akkumulatoren hat stets gewisse Nachteile zum Gefolge. Da die Spannung der Akkumulatoren gegen das Ende der Ladung nämlich um ca. 35% steigt, muss die Dynamo für diese maximale Spannung berechnet sein;

sie ist daher während dem Parallelbetrieb äusserst schwach gesättigt und giebt leicht zum Feuern Veranlassung. Man wendet deshalb in fast sämtlichen grösseren Centralen mit Akkumulatorbetrieb besondere Zusatzmaschinen an, welche mit der Hauptmaschine in Serie geschaltet werden und die Mehrspannung liefern müssen. Da auch gleichzeitig mit der Zunahme der Spannung eine Verringerung der Ladestromstärke eintreten muss, können diese Zusatzmaschinen für eine etwas geringere Stromstärke berechnet werden.

Regulierung von Nebenschlussmaschinen.

Eine Betrachtung der Gleichung:

$$\mathfrak{J} = \frac{E}{R}$$

lässt erkennen, dass man durch Hinzuschalten eines variablen Widerstandes zu den Magnetwicklungen $\mathfrak{J}$ beliebig variieren kann, folglich auch die Spannung. Da diese aber nicht proportional dem Erregerstrom $\mathfrak{J}$ ist, so hängt die Grösse eines solchen Rheostaten — der, wenn nicht besondere Verhältnisse vorliegen, gewöhnlich für Regulierung von 5—10% der totalen Spannung berechnet wird — hauptsächlich vom Sättigungsgrade der Maschine ab, und fällt um so grösser aus, je grösser letzterer ist.

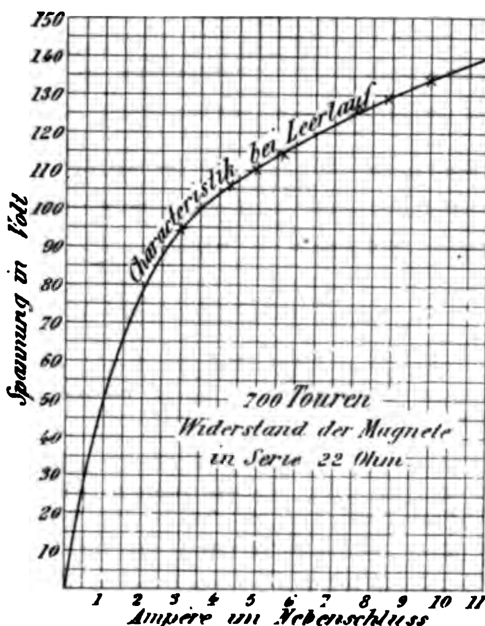


Fig. 69.

Beispiel 2. Fig. 69 sei die Magnetisierungskurve einer Lichtmaschine von 110 Volt für separate Erregung und konstante Tourenzahl (700 per Minute). Widerstand der Magnete in Serie = 22 Ω.

Wie muss der Widerstand des Regulators berechnet sein, um bei einer Tourenschwankung von ca. 28% (14% aufwärts und 14% abwärts) noch auf konstante Spannung regulieren zu können?

Wir wollen zunächst den Armaturwiderstand und die Armaturreaktion vernachlässigen.

Es ist einleuchtend, dass die Spannung der Maschine bei konstanter Erregung im gleichen Verhältnis wie die Tourenzahl steigt oder fällt. In einem

Falle haben wir 1,14 . 700 = 800, im andern 0,86 . 700 = 600 Touren. Um daher bei einer Steigerung der Tourenzahl um 14 % die ursprüngliche Spannung von 110 Volt beizubehalten, muss die Erregung so gewählt werden, dass die derselben entsprechende Spannung multipliziert mit dem Verhältnis $\frac{800}{700}$ noch 110 Volt ergiebt, d. h. wir suchen die Erregung für $110 . \frac{700}{800} = 96{,}4$ V. auf. Dieselbe ist 3,1 Ampère.

Bei normaler Tourenzahl ist die Erregung 5 Ampère, bei 600 Touren (siehe $110 . \frac{700}{600} = 128$ V.) 8,3 Ampère.

Nimmt man an, dass bei 600 Touren sämtlicher Widerstand ausgeschaltet ist, so muss die Magnetwicklung

$$\frac{110}{8{,}3} = 13{,}3\ \Omega,$$

der Regulierwiderstand

$$R_1 = \frac{110}{3{,}1} - 13{,}3 = 22\ \Omega$$

besitzen.

Mit Berücksichtigung des Spannungsabfalls ändert sich nun die Sache ziemlich stark. Beträgt beispielsweise der Spannungsabfall bei voller Belastung 8 %, so ist die E.M.K., welche erzeugt werden muss, $\frac{110}{0{,}92} = 120$ Volt bei 700 Touren oder $120 . \frac{700}{600} = 140$ bei 600 und $110 . \frac{700}{800} = 96$ bei 800 Touren und Leerlauf; die entsprechenden Erregerströme sind 6,6, bezw. 11, bezw. 3,1 Ampère. Folglich Widerstand der Magnete $= \frac{110}{11} = 10\ \Omega$.

$$\text{Vorschaltwiderstand} = \frac{110}{3{,}1} - 10 = 25{,}5\ \Omega.$$

Das voranstehende Beispiel dient nur zur Illustration der Berechnungsmethode. Im allgemeinen jedoch dürften solche Tourenschwankungen wohl kaum vorkommen.

Anmerkung. Aus dem Beispiel ist ersichtlich, dass die Erregerstromstärke zwischen 3,1 und 11 Ampère variiert, es muss also dementsprechend auch der Regulierwiderstand so gehalten werden, dass die letzten Spulen eine dauernde Belastung von 3,1, die ersten 11 Ampère auszuhalten vermögen.

Da der Widerstand der Magnete mit der Temperatur zunimmt, die Stromstärke folglich abnimmt, so ist schon bei Beginn der Stromabgabe ein gewisser Widerstand im Magnetstromkreise vorgeschaltet, der mit Zunahme der Temperatur nach und nach ausgeschaltet wird.

Wo starke Wechsel in der Tourenzahl auftreten, oder auch zur Kompensierung des Spannungsabfalles infolge der Armaturreaktion, wendet man öfters automatische Regulatoren an, desgleichen bei Parallelbetrieb mit Akkumulatoren. Versuche, welche übrigens seinerzeit v[on] der Maschinenfabrik Oerlikon gemeinschaftlich mit der Akkumulator

fabrik Haagen behufs Prüfung des Parallelbetriebes bei elektrischen Bahnen angestellt wurden, zeigten, dass man bis zu einem gewissen Grade das gleiche Resultat erreicht, indem man sowohl den elektrischen, als den Dampfmaschinenregulator aushängt.

Bei der elektrischen Strassenbahn Zürich, der ersten mit Akkumulatoren in der Centrale betriebenen Anlage, wurden der Sicherheit halber beide Regulatoren beibehalten.

Parallelschaltung von Nebenschlussmaschinen.

Bei Beleuchtung mit zwei oder mehr Maschinen werden in der Regel alle parallel geschaltet,

1. um die unvermeidlichen Tourenschwankungen der die Maschinen antreibenden Motoren (Dampfmaschinen u. s. w.) möglichst auszugleichen,
2. um im Falle des Versagens einer Maschine die ihr zugeteilte Last gleichmässig und ohne Unterbruch des Betriebes auf die übrigen Maschinen übertragen zu können.

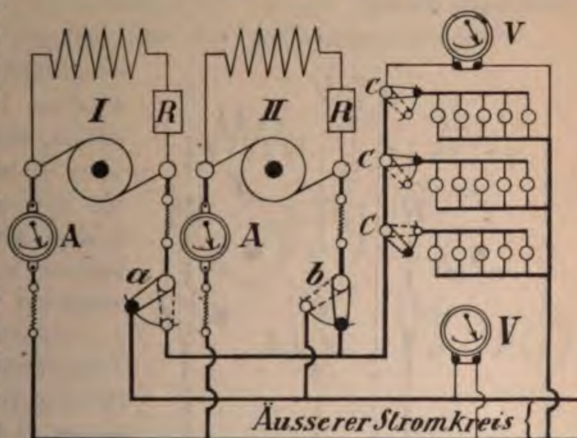


Fig. 70.

Zum nachträglichen Hinzuschalten einer neuen Maschine wandte man früher eine sogenannte Lampenbatterie an, oder man liess die Maschine zuerst auf einen variablen Widerstand arbeiten. Fig. 70 stellt eine solche Anordnung dar: *AA* sind die Ampère-Meter, *V* das Volt-Meter. Nehmen wir an, die Maschine (I) befinde sich bereits im Gange, und es soll (II) hinzu geschaltet werden.

Es versteht sich von selbst, dass schon vor dem Betriebe der Kontakthebel *b* so gestellt werden muss, dass die Maschine (II) mit der äusseren Leitung nicht mehr in Verbindung steht, sondern mit der Lampenbatterie verbunden ist. Man lässt nun die Maschine langsam angehen, bis sie die volle Tourenzahl erreicht hat, schaltet dann successive Lampen der Batterie ein und reguliert mit dem Handregulator *R* der Maschine (II) so lange, bis diese gleiche Spannung und gleiche Belastung wie (I) zeigt, was an dem Volt-Meter und den beiden Ampère-

Metern abgelesen werden kann. Nachdem dies geschehen ist, kann die Maschine durch Umschalten des Hebels *b* mit der ersten Maschine verbunden werden, und müssen nachträglich noch beide Maschinen auf gleiche Belastung reguliert werden.

Eine solche Lampenbatterie ist aber durchaus nicht etwa unentbehrlich, im Gegenteil kann der gleiche Zweck auf einfachere Weise erreicht werden, wenn man die neue Maschine vor dem Einschalten so lange reguliert, bis sie ihre richtige Tourenzahl erreicht hat, und etwa 1—2 Volt weniger als die bereits im Gange befindliche giebt, dann schliesst man den Ausschalter *b* (Fig. 71) und reguliert nun an beiden Maschinen bis ihre Leistungen nahezu gleich geworden sind. Bei genügender Vorsicht kann ein Steigen der Spannung vollständig vermieden werden.

Nebenschlussmaschinen mit sehr geringer Sättigung lassen sich erfahrungsgemäss nicht gut parallel schalten. Desgleichen ist es nicht rätlich, Maschinen von verschiedener Grösse und Sättigung auf ein Netz arbeiten zu lassen, das grossen und schnellen Schwankungen in der Kraftentnahme ausgesetzt ist. Versuche, welche vor einigen Jahren in einer der Tramwaycentralen von Baltimore (Maryland) angestellt wurden, gelangen nach den Mitteilungen des dortigen Betriebschefs erst, nachdem die beiden Maschinen so lange geändert wurden, bis ihre Charakteristiken genau innerhalb den Grenzen, in denen sich die Schwankungen vollzogen, übereinstimmten.

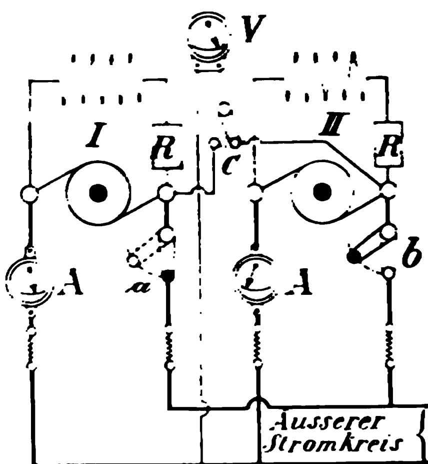


Fig. 71.

Die gleiche Erfahrung machte der Verfasser übrigens auch vor einigen Jahren anlässlich der Ausstellung in Hamburg mit 4 parallelgeschalteten Maschinen von 2 verschiedenen Grössen. Solange die Maschinen schwach belastet waren, schlug das Ampère-Meter fortwährend von Null bis Maximum aus und es trat ein ungefährer Gleichgewichtszustand erst bei annähernd voller Belastung ein.

Anmerkung. Beim Entwurfe von Nebenschlussregulatoren sollte sorgfältig auf gesehen werden, dass der Nebenschluss weder absichtlich noch unabsicht- unterbrochen werden kann. In Wirklichkeit liegt hierfür überhaupt auch ...dürfnis vor, indem eine Maschine von selbst stromlos wird, wenn man ...ndigkeit verringert.

Das Ausschalten ist aus zwei Gründen zu vermeiden: Erstens können die Magnete durch den Extrastrom leicht entmagnetisiert werden und zweitens entsteht hierbei eine so aussergewöhnliche Spannung, dass die Gefahr des Durchschlagens der Isolation nahe liegt.

Ist man trotzdem einmal aus irgend welchem Grunde genötigt, den Nebenschluss zu unterbrechen, so muss dies mit äusserster Sorgfalt geschehen und zwar so, dass man zunächst die Stromstärke durch Vorschalten von Widerstand genügend verringert und den Strom sehr langsam unterbricht, so dass ein langer Lichtbogen gebildet wird.

Die Kompoundmaschine.

(Fig. 72 und 73.)

Wir haben bei der Serienmaschine gesehen, dass die Bürstenspannung bei einer Verminderung des äusseren Widerstandes, resp.

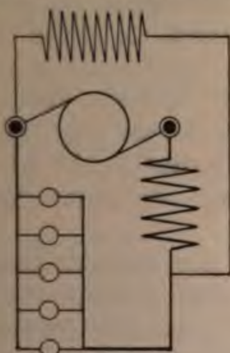


Fig. 72.

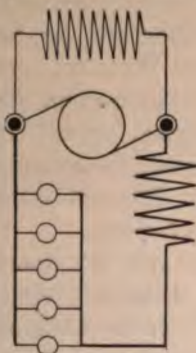


Fig. 73.

Vergrösserung des Stromes, zunimmt; umgekehrt hat bei der Nebenschlussmaschine eine Vergrösserung der Stromentnahme eine Zunahme des Armaturverlustes, mithin eine, wenn auch nicht bedeutende, Abnahme der Bürstenspannung zur Folge. Durch Kombination der beiden Schaltungsweisen sind wir daher im stande, nicht nur eine vollständig konstante Bürstenspannung an der Maschine zu erzeugen, sondern auch gewünschten Falles durch sogenanntes „Überkompoundieren“ die Spannung am Ende der Leitung selbst konstant zu erhalten.

Die Eigentümlichkeit der letzteren Methode wird aus einem Beispiele sofort klar werden.

Setzen wir den Fall, die zu beleuchtende Anlage sei ziemlich weit von der Dynamomaschine entfernt, und es betrage der totale Verlust in der Leitung, wenn sämtliche Lampen eingeschaltet sind, ca. 14 % der gesamten Maschinenspannung[1]), so ist einleuchtend, dass auch bei vollständig gleichbleibender Bürstenspannung die Spannung am Ende

[1]) In Wirklichkeit darf derselbe niemals so viel betragen.

der Leitung niemals konstant bleiben kann, sondern je nach de respektiven Belastung innerhalb 14 $^0/_0$ variieren wird. Die natürlich Folge hiervon wird einesteils eine Unregelmässigkeit in der Beleuch tung, anderseits eine Überbeanspruchung der beim Ausschalten noc verbleibenden Lampen sein, womit in engerem Zusammenhange eine ve minderte Brenndauer steht. Wenn nun auch die Möglichkeit nicht au geschlossen ist, diesem Übelstande mittels geeigneter mechanischer ode elektrischer Regulatoren Abhilfe zu verschaffen, so würde dies immerhi zum mindesten eine Anlage komplizieren und verteuern; viel einfache werden wir uns hierfür der Kompoundmaschine mit Überkompoundi rung bedienen.

Die Schaltung der Kompoundmaschine kann auf 2 Arten erfolge indem man die Nebenschlusswicklung entweder an die Leitungsklammer oder an die Bürsten anlegt. Ist der Widerstand der Seriewicklur zu vernachlässigen, so haben augenscheinlich die beiden Schaltung die gleiche Wirkung, nicht so dagegen, wenn der Ohmsche Verlu dieser Wicklung einige Prozente ausmacht. In diesem Falle würde z. eine Maschine, welche ursprünglich nach Schema (Fig. 72) geschalte eine konstante Spannung bei Voll- und Leerlauf ergiebt bei der Scha tung (Fig. 73) und voller Beanspruchung eine kleine Spannungse höhung aufweisen.

Wird von der Kompoundmaschine eine konstante Spannung fi beliebige Belastung verlangt, so ist dies nur dadurch erreichbar, da man mit einem Sättigungsgrad arbeitet, der dem geraden Teil d Charakteristik oberhalb dem Knie entspricht. Im allgemeinen habe jedoch kleine Abweichungen von 1—2 $^0/_0$ keine Bedeutung und ist auch mit Rücksicht auf das Kupfergewicht nicht rätlich, die Sättigur allzuweit zu treiben. Unter diesen Umständen steigt die Spannur mit zunehmender Belastung ein klein wenig und nähert sich de ursprünglichen Wert erst bei Volllauf.

Die Berechnung der Kompoundmaschine ergiebt sich sofort a den für Nebenschluss- und Seriemaschinen aufgestellten Formeln.

Es sei z. B. die auf Seite 91 erwähnte Nebenschlussmaschine n einer Kompoundwicklung zu versehen. Der Spannungsabfall inklusi dem Ohm'schen Verlust in der Seriewicklung betrage 10 $^0/_0$. Fern sei angenommen die Versuchsmaschine habe auf jedem Magnet 800 Wi dungen gehabt.

Aus den Kurven Fig. 69 folgt

	E.M.K.	Erregerstrom	Ampère-Windungen
Bei Leerlauf	110	5	5 . 800 = 4400 pro Spul
„ Volllauf	$\frac{110}{0,9} = 122$	7	7 . 800 = 5600 „ „

Folglich erhält die dünne Wicklung $(\mathfrak{J}\, m) = 4000\ a w$
die dicke Wicklung $(\mathfrak{J}\, m)' = 5600 - 4000 = 1600\, a w$.

Die respekt. Windungslängen und Verluste seien folgende:

$$\mathfrak{L} = 0{,}65 \text{ m} \qquad \varepsilon \mathfrak{J} = 5 \text{ Amp.}$$
$$\mathfrak{L}' = 0{,}82 \text{ m} \qquad \varepsilon E = 0{,}6 \text{ Volt.}$$
$$m_1 = 2, \; J = 120 \text{ Amp.}$$

Somit ist noch Gleichung (61)

Dünne Wicklung $s = \frac{(\mathfrak{J}\, m)\, m_1\, \mathfrak{L}}{E\,.\,50} = \frac{4000\,.\,2\,.\,0{,}65}{110\,.\,50} = 0{,}95 \text{ mm}^2$

$$m = \frac{(\mathfrak{J}\, m)}{\varepsilon \mathfrak{J}} = \frac{4000}{5} = 800.$$

Dicke Wicklung $s = \frac{(\mathfrak{J}\, m)'\, m_1\, \mathfrak{L}'}{\varepsilon E\,.\,50}$

$$= \frac{1600\,.\,2\,.\,0{,}82}{0{,}6\,.\,50} = 87 \text{ mm}^2$$

$$m' = \frac{\mathfrak{J}\, m'}{\mathfrak{J}} = \frac{1600}{120} = 13.$$

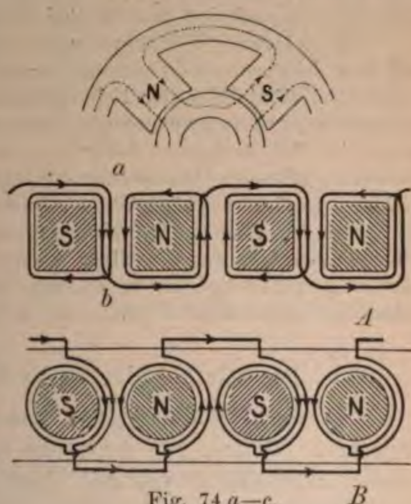


Fig. 74 a—c.

Bei Maschinen mit sehr grossen Stromstärken kann es vorkommen, dass schon 1—3 Windungen pro Magnet für die Serienwicklung genügen. Ist die Zahl ungerade, so bleibt nichts anderes übrig, als die Verbindungen zwischen den einzelnen Spulen auf beiden Seiten der Magnete auszuführen.

Bei dieser Gelegenheit mag noch eine Bemerkung bezüglich der Ausführung dieser Verbindungen eingeschaltet werden. Fig. 74 *b* und *c* stellen die Abwicklungen der Magnete in einer Ebene für viereckige und runde Magnetkerne dar. Da nur derjenige Teil der Wicklung wirksam ist, welcher senkrecht zur Ebene des nützlichen magnetischen Stromkreises steht, so zählt mithin bei der ersten Anordnung nur die Länge *a*. Anders steht es mit der zweiten Anordnung, und sollten hier die Verbindungen an die Punkte *A* und *B* angeschlossen werden.

Diese Bemerkungen haben selbstverständlich nur Bedeutung für Serienwicklungen mit sehr wenig Drähten, da andernfalls eine Windung mehr oder weniger ohne Einfluss bleibt.

Kompoundmaschinen werden gleich wie die Nebenschlussmaschinen

durch einen mit der dünnen Wicklung in Serie geschalteten variablen Widerstand reguliert.

Anmerkung. Zum Laden von Akkumulatoren eignen sich Kompoundmaschinen deshalb nicht, weil ein eventueller Rückstrom aus der Akkumulatorenbatterie die Magnete entmagnetisieren und Kurzschluss herbeiführen kann. Dennoch ist man unter gewissen Umständen genötigt, solche für den genannten Zweck zu benutzen, z. B. da, wo für die Beleuchtung bereits eine Kompoundmaschine vorhanden ist und man nachträglich noch Akkumulatoren zu Hülfe nehmen will, nur darf man es an der nötigen Sorgfalt nicht fehlen lassen, wenn Betriebsstörungen ausgeschlossen sein sollen.

Bei der elektrischen Tramanlage in Zürich, wo Kompoundmaschinen vorhanden sind, wird die Kompoundwicklung bei Parallelbetrieb mit den Akkumulatoren ausgeschaltet und nur bei reinem Maschinenbetrieb benutzt.

Für elektrische Tramwayanlagen sind Kompoundmaschinen unentbehrlich, weil hier die Stromschwankungen überaus schnell stattfinden, so dass infolge der grossen Selbstinduktion der Nebenschlusswicklung bei Anwendung von Nebenschlussdynamos starke Spannungsschwankungen eintreten würden. Bei Beleuchtungen ist dies weniger zu befürchten; da hier, speziell bei niedrig gespannten Maschinen grösserer Dimensionen die konstruktive Ausführung einer Kompoundwicklung gewisse Schwierigkeiten verursacht, so werden häufig Nebenschlussmaschinen vorgezogen. Die Notwendigkeit einer Kompoundierung ist bei sehr grossen Maschinen auch weniger vorhanden, da einerseits der Armaturverlust äusserst gering ist und eine vollständige Spannungsregulierung der verschiedenen belasteten Feeders durch blosse Kompoundierung von vornherein ausgeschlossen ist.

Parallelschalten von Kompoundmaschinen.

Um Kompoundmaschinen parallel schalten zu können, müssen diejenigen Bürsten, von denen die Kompoundwicklung abzweigt, durch einen Ausgleichdraht *(a)* mit einander verbunden werden, weil sonst bei Unregelmässigkeiten in den Tourenzahlen die schneller laufende Maschine einen Strom von entgegengesetzter Richtung durch die Kompoundwicklung der anderen Maschine schicken würde (siehe Fig. 75).

Beim Parallelschalten der zweiten Maschine wird zunächst der Ausgleichdraht eingeschaltet und zur Konstanthaltung der Spannung die erste Maschine sofort nachreguliert; hierauf wird auch die zweite Maschine auf normale Tourenzahl und Spannung (letztere vielleicht $1—1^1/_2\,^0/_0$ geringer als die Spannung der im Betrieb befindlichen Maschine) gebracht und dann parallel geschaltet.

Um zu verhüten, dass eventuell aus Unvorsichtigkeit die zweite Maschine hinzugeschaltet wird, ohne dass die Ausgleichleitung eingeschaltet ist, hat der Betriebschef der Marseiller Tramanlage Herr H. Dubs, im Electrician (1895) eine einfache Schaltung angegeben, welche darin besteht, dass die Spannung der zweiten Maschine nicht eher abgelesen werden kann, bis der Ausgleichdraht funktioniert. Die schematische Anordnung ist aus Fig. 76 ersichtlich. Nehmen wir an,

es laufe Maschine Nr. I und es sei Nr. II parallel zu schalten. Zu diesem Zwecke werden die Hebel *a* und *b* geschlossen und Dynamo II auf Touren und Volt einreguliert, worauf der doppelpolige Ausschalter *B* geschlossen werden kann.

Beim Ausschalten verfährt man genau in umgekehrter Reihenfolge,

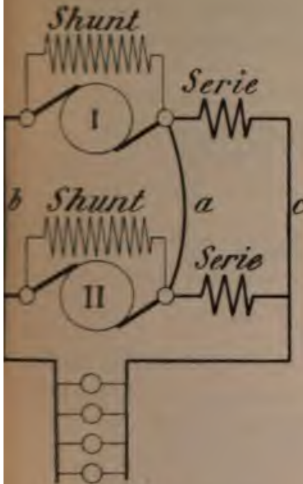


Fig. 75.

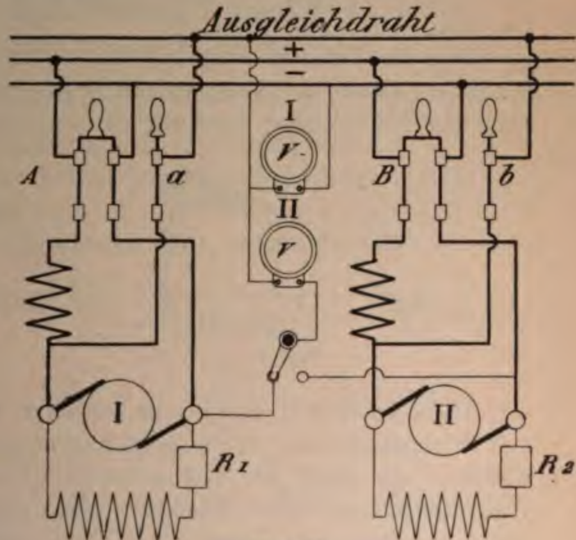


Fig. 76.

reduziert jedoch vorher den Armaturstrom durch Einschalten von Widerstand in den Magnetstromkreis oder Verminderung der Tourenzahl so, dass er beinahe Null wird.

Kompoundmaschine, System Sayers.

Die Kompoundmaschine von Sayers (Engl Patent Nr. 9364, vom 2. Mai 1896) beruht auf der Seite 44 besprochenen Verzerrung des Feldes durch die Armaturreaktion. Es bedeute in Fig. 77 die punktierte Linie die Gestaltung des Feldes bei Leerlauf, die ausgezogene Linie Form des Feldes bei voller Belastung, *a* und *b* die Hauptbürsten, von welchen die Leitung abzweigt. Bringen wir ungefähr in der Mitte zwischen den Bürsten *a* und *b* eine dritte Bürste *c* an, so ist klar, dass bei Leerlauf die Spannung zwischen *a c* gleich derjenigen zwischen *c b* ist. Mit zunehmenden Armaturstrom dagegen ändert sich dieses Verhältnis, d. h. die Spannung nimmt zwischen *a c* ab und steigt umgekehrt zwischen *c b*. Sayers benutzt diese Eigenschaft, um gewöhnliche Nebenschlussmaschinen zu kompoundieren. Zu diesem Zwecke

legt er die Nebenschlusswicklung, welche nunmehr für die halbe Spannung bemessen sein muss, an die Bürsten *c* und *b*. Erweist sich die Kompoundierung bei der angegebenen Schaltung als zu wenig wirksam, so kann dieselbe gesteigert werden, dass man die Hilfsbürste etwas im Sinne der Drehrichtung vorschiebt (Fig. 78). In diesem Falle ist die Nebenschlusswicklung für eine entsprechend geringere Spannung vorzusehen.

Wie die Versuche dargelegt haben, ist es möglich, bei richtiger Wahl der Armatur und Magnetwicklung eine nahezu konstante Klemmenspannung für beliebige Belastung zu erreichen.

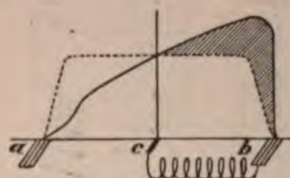


Fig. 77.

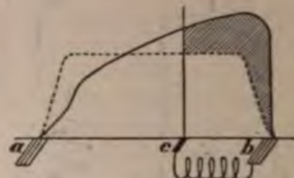


Fig. 78.

Diese Anordnung besitzt den doppelten Vorteil grosser Einfachheit und Betriebssicherheit, da die Spannung an den Klemmen der Magnetwicklung nur gleich der halben Betriebsspannung ist. Ferner ist die Parallelschaltung solcher Maschinen etwas einfacher und können solche Maschinen auch zum Laden von Akkumulatoren benutzt werden.

Eine Funkenbildung an den Hilfsbürsten scheint nicht zu befürchten zu sein, da die Stromstärke, welche hier abgenommen wird, verhältnismässig gering ist. Im übrigen lässt sich, falls ein Feuern stattfinden sollte, diesem Übelstande dadurch begegnen, dass man die Pole in der Mitte mit breiten Einschnitten versieht.

B. Vergleiche über die drei Wicklungsarten bei Kraftübertragungsmaschinen.

Die Serienmaschine im allgemeinen.

Die elektrischen Vorgänge beim Betriebe einer Kraftübertragung durch zwei Serienmaschinen lassen sich kurz in das nachstehende Resumé zusammenfassen:

Jede Änderung in der Belastung der Sekundärdynamo zieht eine entsprechende Vergrösserung oder Verkleinerung der gesamten elektrischen Stromstärke nach sich;

da nun die Spannung an der Primärdynamo nicht nur von der Tourenzahl, sondern auch in weiterer Linie von der Er-

regung der Feldmagnete abhängig ist, so wird dieselbe sowohl an der primären, wie auch an den Klemmen der sekundären Maschine je nach der Belastung und dem Widerstande der Leitung innerhalb beträchtlichen Grenzen schwanken.

Die variablen Grössen an der Sekundärdynamo sind nun:

1. die Klemenspannung $E_1 = E - JR$,

2. die durch die Magnetwicklung erzeugte totale Induktion Φ; soll also hier die Tourenzahl konstant bleiben, so ist dies so lange der Fall, als der Quotient aus $\frac{E_1}{\Phi}$ eine konstante Grösse bleibt, wie gross auch die Schwankungen der Spannung seien.

Es geht schon daraus hervor, dass für die Bedingung einer vollständig konstanten Tourenzahl ein einfaches Parallelschalten zweier oder mehrerer Serienmotoren, wovon vielleicht nur einer

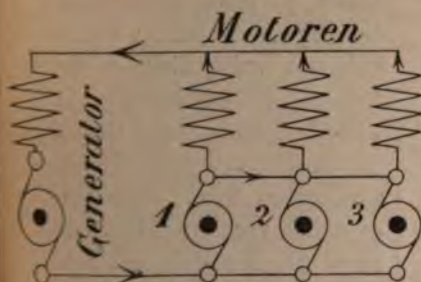


Fig. 79.

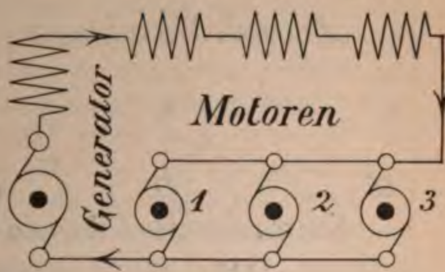


Fig. 80.

erheblichen Schwankungen in der Kraftentnahme unterworfen ist, von einer einzigen primären Serienmaschine aus nicht mehr möglich ist, weil eben jede Änderung in der Beanspruchung dieses Motors eine Änderung der durch die primäre Maschine fliessenden Stromstärke, somit ein Fallen oder Steigen der primären, und mit ihr der Spannung an sämtlichen Motoren zur Folge hat, nicht aber eine in gleichem Massstabe stehende Verkleinerung oder Vergrösserung der Kraftlinienzahl in allen Motoren, wodurch deren Tourenzahlen höchst unregelmässige werden müssten.

Dieser Übelstand ist bei der in Fig. 79 gezeichneten Anordnung zum Teil vermieden. Wäre z. B. Motor (1) stärker belastet, so verteilt sich der durch die Armatur (1) fliessende Strom gleichmässig auf alle 3 Magnete, vorausgesetzt, dass die Magnet-Wicklungen gleichen Widerstand besitzen. Gerade hierin liegt aber das Bedenkliche, weil es praktisch beinahe unmöglich ist, die Widerstände ganz genau gleich gross herzustellen. Zudem wird häufig gewünscht, Motoren verschiedener Grössen von der gleichen Primärmaschine aus anzutreiben, in welchem

Falle die genannte Bedingung so wie so nicht erfüllbar ist. Es ist daher eine Anordnung, wie Fig. 80 zeigt, vorzuziehen, sofern die Motoren sich nicht zu weit von einander befinden, weil hier der Widerstand der Magnetspulen beliebig gross sein kann.

Ein Hintereinanderschalten gleichartiger Serienmaschinen hat trotz des bedeutenden Vorteils einer billigeren Leitung immer seine Nachteile, weil das Ein- und Ausschalten einzelner Motoren gewisse Schwierigkeiten darbietet. Ein Übelstand ist z. B. der, dass ohne spezielle Reguliervorrichtungen beim Ausschalten eines oder mehrerer Motoren die übrigen schneller laufen. Bei Verwendung von mehreren Primärdynamos könnte dem allerdings dadurch abgeholfen werden, dass man gleichzeitig eine äquivalente Zahl primärer Maschinen von der gleichen Stärke ausser Funktion stellen würde, was indessen, wie jeder, der schon mit derartigen Anlagen zu thun gehabt hat, weiss, nicht so ohne weiteres zu bewerkstelligen ist, besonders wenn jeder Generator einzeln von einer Turbine angetrieben wird. Man zieht es daher vor, sowohl Generatoren als Motoren mit automatischen Regulatoren zu versehen, welche bei ersteren auf konstante Stromstärken, bei letzteren auf konstante Tourenzahl regulieren. Natürlich wird dadurch die Anlage in nicht geringem Masse kompliziert.[1])

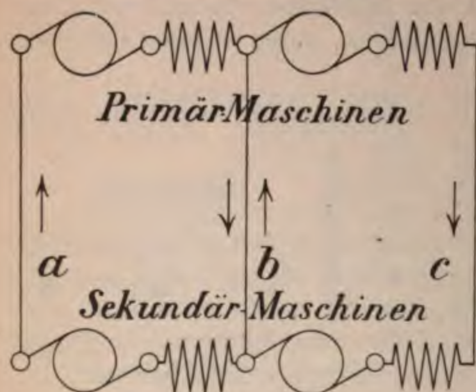


Fig. 81.

Um sich den Vorteil einer möglichst billigen Leitung zu sichern und andererseits die Motoren beliebig ein- und ausschalten zu können, wendet man auch hie und da das sogenannte Dreileiter- oder Mehrleitersystem an.[2]) Fig. 81 stellt das Schema für eine Dreileiteranlage dar.

So lange die beiden Motoren gleich stark belastet sind, verhält sich die Sache wie bei 4 in Serie geschalteten Maschinen, und es wird

---

[1]) Obwohl eine Anzahl nach diesem System von der Cie. Industrielle in Genf gebauter Kraftübertragungsanlagen (zum Teil mit bedeutenden Distanzen und Spannungen) seit Jahren im Betrieb stehen und also über deren Ausführbarkeit keine Zweifel mehr herrschen, so drängt sich mir doch stets der Eindruck auf, dass hier der Gleichstrom seine Grenzen gefunden hat und vorteilhafter durch Drehstrom ersetzt würde.

[2]) Anlage Steirermühl mit zusammen 8 Maschinen.

durch den Mittelleiter *b* kein Strom fliessen. Sobald aber einer der Motoren mehr beansprucht wird als der andere, so fliesst durch *b* ein Strom, der gleich der Differenz in den Stromstärken beider Sekundärmaschinen ist. Der maximale Strom entsteht in *b* natürlich dann, wenn einer der Motoren ganz leer läuft oder ausgeschaltet wird. Man wird daher zweckmässig diesen mittleren Leiter ebenso stark wie die beiden anderen wählen, oder noch stärker, da sonst die Spannung im übrig bleibenden Motor zu starken Schwankungen unterworfen ist.

Von einer völlig gleichbleibenden Tourenzahl der Sekundärmaschinen bei allen Leistungen kann hier allerdings nicht mehr die Rede sein, in vielen Fällen hat dies aber auch nichts zu sagen.

Bei Kraftübertragungen auf grosse Distanz mit zwei Sekundärmaschinen wird also die Frage auftreten, ob das Dreileitersystem den beiden vorgenannten Anordnungen vorzuziehen sei. Ein allgemein richtiger Schluss lässt sich an dieser Stelle natürlich nicht ziehen, weil eben die örtlichen Verhältnisse ausschlaggebend sind. Es ist eine bekannte Thatsache, dass man mit der Spannung von Gleichstrommaschinen (speziell mit Ringarmaturen) bei genügender Sorgfalt ohne Bedenken bis auf 2000 Volt und höher gehen kann, ferner ist einleuchtend, dass eine Spannung von 1000 Volt für die menschlichen Organe genau ebenso gefährlich wird, wie eine solche von 2000 Volt; schliesslich muss bedacht werden, dass zwei Primärmaschinen von gleicher Leistung erheblich mehr kosten, als eine einzige von der doppelten Stärke. Dennoch wird man sich in manchen Fällen bestimmen lassen, das Dreileitersystem anzuwenden, sei es der grösseren Betriebssicherheit halber, oder auch dann, wenn es sich z. B. darum handelt, zwei an verschiedenen Orten befindliche Wasserkräfte für die gemeinsame Kraftübertragung auszunützen.

Aus nahe liegenden Gründen vermeidet man es, Seriemotoren, die sehr variabler Belastung unterworfen sind, oder für Momente gar keine Arbeit abzugeben haben, in eine Stromquelle von konstanter Spannung einzuschalten. Tritt nämlich ein solcher Moment ein, so fällt der Armatur- resp. Magnetstrom fast auf Null herunter und die Maschine wird mit kolossaler Geschwindigkeit zu drehen beginnen.

Tramway-Motoren.

Bei elektrischen Tramways, wo die Motoren gleichsam mit der Schiene gekuppelt sind, so dass sie überhaupt nie leer laufen können, wird man gerade Serienmaschinen den Vorzug geben, weil sie

neben grösserer Isolierfähigkeit für das Anlaufenlassen und Regulieren u. s. w. verschiedene Vorteile besitzen.[1])

Bekanntlich lassen sich elektrische Tramways auf zwei Arten betreiben:

a) Mittelst Akkumulatoren, wobei die treibende Kraft auf dem Wagen selbst mitgeführt wird;

b) Mittelst oberirdischer oder unterirdischer Stromzuführung.

Dementsprechend muss auch die Reguliermethode verschieden gewählt werden. Bei Anwendung von Akkumulatoren speziell gestaltet sich diese sehr einfach. Man teilt die ganze Batterie in bestimmte, gleich grosse Abteilungen, deren Enddrähte zu einem Spezialumschalter führen. Beim Anlaufenlassen schaltet man alle Abteilungen parallel. Da die Spannung sehr klein ist, läuft also der Wagen sehr langsam an; will man schneller fahren, so schaltet man einzelne Abteilungen hinter einander, und beim schnellsten Betriebe sind schliesslich alle Gruppen in Serie. Wesentlich verschieden fällt die Regulierung bei der zweiten Anordnung aus. Nach dem früher Gesagten sind 4 Methoden denkbar, um eine Veränderung der Tourenzahl herbeizuführen:

1. Man schaltet der Maschine einen Widerstandsregulator vor, mit welchem man die Spannung in zweckentsprechender Weise verändern kann;
2. man behält eine konstante Spannung bei und reguliert durch einen, dem bei Akkumulatorenbetrieb erwähnten ähnlichen Umschalter die Magnetwicklung, wodurch sich die Linienzahl ändert;
3. man wendet beide Methoden gleichzeitig an. Während hierfür einige Konstrukteure einen speziellen Widerstand vorschalten, wählt beispielsweise der bekannte Amerikaner Sprague den Widerstand der Magnetwicklung derart, dass ein weiterer Widerstandskasten wegfällt.
4. Wird der Motor nach Rechniewsky 4polig und mit Grammering ausgeführt, so kann die Geschwindigkeit auf die Hälfte reduziert werden, indem man die Stromrichtung in zwei aufeinanderfolgenden Polen umkehrt und durch einen Umschalter die Leitung an zwei gegenüberliegende Bürsten legt (Lum. El. Juli 1893). Erfordert etwas grösseres Motorengewicht und einen ziemlich komplizierten Umschalter.

---

[1]) Auch ganz kleine Dynamos von $\frac{1}{8}-\frac{1}{10}$ PS zum Antriebe von Nähmaschinen oder dergleichen, die an das Beleuchtungsnetz angeschlossen werden sollen, lassen sich aus technischen Gründen nur als Serienmaschinen ausführen. Hier ist aber ein „Durchbrennen“ bei Nullbelastung um so weniger zu befürchten, als die Reibungsarbeit unverhältnismässig gross ist.

5. Sofern der Wagen 2 Motore enthält, können beim Anlassen beide Motoren in Serie mit einem entsprechenden Widerstand geschaltet werden. Die Anlassgeschwindigkeit wird dadurch auf weniger als die Hälfte reduziert. Wünscht man die Geschwindigkeit zu vergrössern, so wird successive Widerstand ausgeschaltet und nachträglich eine Parallelschaltung vorgenommen. Die gleiche Methode ist auch auf Motoren mit zwei Armaturwicklungen anwendbar.

Die Theorie der Tramwaymotoren und ihre Regulierung ist für den heutigen Elektrotechniker von solcher Wichtigkeit, dass wir bei diesem Kapitel etwas länger verweilen müssen.

Die Geschwindigkeit des Motors ist gegeben durch die Formel

$$n = \frac{E \,.\, 60 \,.\, 10^8}{N \,.\, \Phi} \cdot \frac{p_1}{p}.$$

Für die praktischen Berechnungen ist es nun fast immer bequemer, statt der Tourenzahl n die Wagengeschwindigkeit v in m pro Minute in die Rechnung einzuführen.

Es bedeute D der Durchmesser der Wagenräder in m und a das Übersetzungsverhältnis, so ist

$$v = \frac{n}{a} \cdot D\pi = \frac{E \,.\, 60 \,.\, 10^8 \,.\, p_1}{N \,.\, \Phi p} \cdot \frac{D\pi}{a}.$$

Es soll in dem Nachstehenden nur der Seriemotor behandelt werden, der sich seiner besonderen Eigenschaften wegen in erster Linie als Tramwaymotor eignet.

Der Umstand, dass auf der Linie in der Regel eine grössere Zahl von Wagen gleichzeitig verkehren, bringt es mit sich, dass man fast ausschliesslich mit konstanter Spannung in der Centrale arbeitet, so dass also die Spannung an den Motoren höchstens um den Betrag des Spannungsverlustes differieren kann.

Es sei

P das durch Motor fortzubewegende Gewicht in Tonnen = Wagengewicht + Gewicht der Nutzlast + Gewicht der elektrischen Ausrüstung,

v wie oben die Fahrgeschwindigkeit in m per Minute,

α der Traktionskoefficient = 10—12 für Tramways und 4— 6 für Bahnen,

β die Steigung in $^0/_{00}$.

Dann beträgt die effektive aufzuwendende Arbeit des Motors

$$PS = \frac{v \,.\, P(\alpha + \beta)}{75 \,.\, 60} \qquad (64)$$

oder bei einem kommerziellen Nutzeffekt ζ findet man die Stromstärke

$$(65) \qquad J = \frac{9{,}81 \cdot v P(\alpha + \beta)}{E \cdot \zeta \cdot 60} = c \cdot v(\alpha + \beta),$$

insofern P und E und ζ konstant angenommen wird.

Diese Formel soll uns dazu dienen, die Stromstärke und Fahrgeschwindigkeit auf beliebiger Steigung auszurechnen. Zu diesem Zwecke wird der Motor ein für allemal abgebremst und seine Tourenzahl und Stromstärke bei konstanter Spannung notiert. Durch mehr oder weniger starkes Anziehen der Bremse wird nun eine vollständige Versuchsreihe durchgeführt und das Resultat graphisch aufgetragen, wobei man statt der Tourenzahldie Fahrgeschwindigkeit in m per Minute, oder auch beides angiebt. Fig. 82 zeigt eine solche Charakteristik.

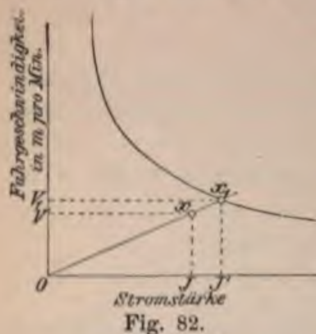


Fig. 82.

Ist der Motor noch nicht konstruiert, so kann diese Kurve auch leicht auf rechnerische Weise gefunden werden, wobei berücksichtigt werden muss, dass die theoretische Tourenzahl entsprechend der Stromstärke zu reduzieren ist.

Wir haben nun zwei unbekannte Grössen J und v, für welche die Bedingung gilt, dass dieselben

1. auf der Charakteristik enthalten sein müssen,
2. der Gleichung (65) Genüge zu leisten haben.

Die Aufgabe ist eine höchst einfache[1]): Wir berechnen J für ein ganz beliebiges v und ziehen durch den gefundenen Punkt x eine Gerade Ox nach dem Nullpunkt der Coordinaten; die Coordinaten des Schnittpunktes x_1 mit der Charakteristik entsprechen dann der gesuchten Fahrgeschwindigkeit v_1, bezw. Stromstärke J_1.

Für v wählt man natürlich einen Wert nahezu gleich der minimalen Geschwindigkeit, ausgenommen dann, wenn man die Geschwindigkeit in Gefällen ermitteln will, wo es sich der Genauigkeit halber empfiehlt, v grösser anzunehmen.

Beispiel. Es soll in einem bestimmten Falle berechnet werden, wie sich der Stromverbrauch und die Geschwindigkeit eines automobilen Wagens für

---

[1]) Vergl. Aufsatz des Verfassers „Über die Regulierung von Tramwaymotoren“ (Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien, 1. und 15. Juni 1893, ferner „Lösung prakt. Fragen über Gleichstrommaschinen auf graphischem Wege“ (Elektr. Zeitschrift, 19. Juli 1894).

12 Personen auf verschiedenen Steigungen gestalte. Die maximale Steigung betrage 50 ‰. Den Traktionskoeffizienten wollen wir zu 10 kg pro Tonne annehmen. Das komplette Gewicht des Wagens setzt sich nun, wenn man vorläufig das Gewicht der elektrischen Ausrüstung schätzungsweise einsetzt, wie folgt zusammen:

Gewicht des Wagens allein	2,80 Tonnen.
„ der elektrischen Ausrüstung	1,40 „
„ „ Personen	2,24 „
Zusammen	6,44 Tonnen.

Maximale Zugkraft = (10 + 50) 6,44 = 386 kg.

Es wäre nun zu untersuchen, ob die für eine solche Leistung bemessene elektrische Ausrüstung das obige Gewicht besitzt; eventuell ist die Berechnung für die neue Annahme noch einmal zu machen.

Es sei hier vorausgesetzt, die erste Annahme sei zutreffend, ferner besitze der gewählte Motor die aus Fig. 83 ersichtliche Charakteristik.

Mittlere Bürstenspannung = 500 Volt, Nutzeffekt bei maximaler Belastung $\zeta = 0{,}82$.

Nach Gleichung (65) ist

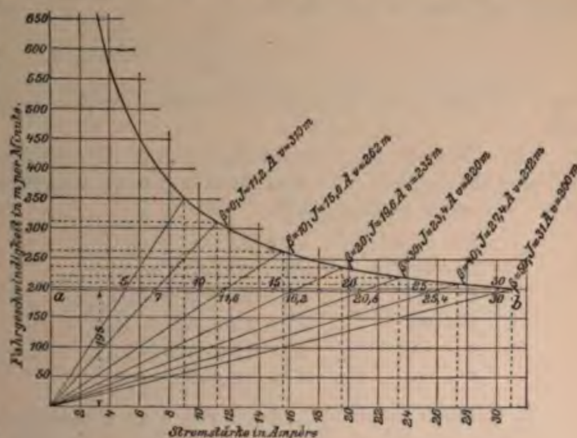


Fig. 83.

$$J = \frac{9{,}81\,v\,.\,6{,}44\,(\alpha + \beta)}{500\,.\,0{,}82\,.\,60} = 0{,}00256\,v\,(\alpha + \beta).$$

Nimmt man beispielsweise $v = 195$ m pro Minute an, so erhalten wir folgende für die Berechnung bequeme Formel

$$J' = 0{,}5\,(\alpha + \beta),$$

welcher allerdings der maximale Nutzeffekt zu Grunde liegt; die Folge davon ist, dass J etwas kleiner, v daher grösser als in Wirklichkeit ausfällt. Wir werden weiter unten sehen, wie das Resultat für genaue Berechnungen zu korrigieren ist, der Einfachheit halber sei ζ zunächst konstant angenommen, ferner die Fahrgeschwindigkeit $v = 195$ m. Es ist dann für

$\beta = 0$ ‰	$J' = 5$ Ampère,
$\beta = 10$	$J' = 10$ „
$\beta = 20$	$J' = 15$ „
$\beta = 30$	$J' = 20$ „
$\beta = 40$	$J' = 25$ „
$\beta = 50$	$J' = 30$ „

d. h. für je 10 ‰ Steigung gleich 5 Ampère mehr als in der Ebene. Wir ziehen also im Abstande 195 zur Abscissenaxe die Parallele ab und tragen auf

derselben die obigen Stromstärken mit dem Zirkel auf. Verbinden wir diese Punkte noch mit dem Coordinatenanfang, so erhalten wir in den Schnittpunkten dieser Geraden mit der Charakteristik erste Annäherungswerte.

Diese Methode reicht in der Regel für die gewöhnlichen Projektsberechnungen vollständig hin, um so mehr, wenn man für ζ nicht den maximalen, sondern einen mittleren Wert einsetzt.

Genauere Resultate sind auf folgende Weise erhältlich: Wir sehen, dass die maximale Stromstärke, d. h. diejenige, bei welcher $\zeta = 0,82$ wird, 31 Ampère beträgt. In der Ebene sind dann noch ca. 9 Ampère, d. h. 30% der Maximalleistung, erforderlich.

Nehmen wir hier noch den Nutzeffekt zu $58^1/_2\%$ an (eine Zahl, die nur zur bessern Darstellung so klein gewählt wurde, in Wirklichkeit ist sie bedeutend grösser), so wird für $\beta = 0$

$$J' = 5 \cdot \frac{82}{58,5} = 7 \text{ Ampère},$$

oder 2 Ampère mehr als berechnet wurde; für $\beta = 50$ ist die Differenz gleich Null.

Um also bei der Geschwindigkeit 195 die richtigen „Hilfs“stromstärken zu finden, haben wir, von dem Punkte $\beta = 50$ ausgehend, die ursprünglichen Zahlen wie folgt zu korrigieren:

$\beta = 50\permil$	$J' = 30,$	$J = 31$
$\beta = 40$	$J' = 25 + 0,4 = 25,4,$	$J = 27,4$
$\beta = 30$	$J' = 20 + 0,8 = 20,8,$	$J = 23,4$
$\beta = 20$	$J' = 15 + 1,2 = 16,2,$	$J = 19,6$
$\beta = 10$	$J' = 10 + 1,6 = 11,6,$	$J = 15,6$
$\beta = 0$	$J' = 5 + 2 = 7,$	$J = 11,2$

In Gefällen unter $10\permil$ ist β von α zu subtrahieren.

Das einzige Beispiel mag genügen, um zu zeigen, dass Tramwaymotoren vor allem stark gesättigt sein sollen, damit die Geschwindigkeit in der Ebene nicht übermässig gross ausfällt.

Wir wenden uns nun zu den verschiedenen im Gebrauch befindlichen Reguliermethoden:

a) Regulierung mittelst Vorschaltwiderstand.

Nehmen wir an, ein Motor laufe in irgend einer Steigung und ohne Widerstand mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit v, wobei die Stromstärke J Ampère und der Widerstand der Magnete und der Armatur r Ohm betragen soll, so ist

$$v = c \cdot \frac{E - Jr}{\Phi} = \frac{E - Jr}{f(J)},$$

ferner die geleistete effektive Arbeit

$$A = J(E - Jr) - w.$$

w stellt den Hysteresis- und Reibungsverlust dar. Um die Geschwindigkeit des Motors auf diejenige von v_1 zu reduzieren, muss der

Maschine ein Widerstand R vorgeschaltet werden. Wir wollen nun ohne Rücksicht auf die Richtigkeit unserer Voraussetzung annehmen, es ergebe sich bei der neuen Geschwindigkeit v_1 eine Stromstärke J_1, so muss natürlich

$$v_1 = \frac{E - J_1 (r + R)}{f(J_1)}$$

sein und die nunmehr geleistete effektive Arbeit ist

$$A_1 = J_1 \left[E - J_1 (r + R) \right] - w_1.$$

Es ist klar, dass sich

$$A : A_1 = v : v_1$$

verhalten muss, oder, indem wir die einzelnen Werte einsetzen:

$$\frac{J(E - Jr) - w}{J_1 (E - J_1 (r + R)) - w_1} = \frac{\frac{E - Jr}{f(J)}}{\frac{E - J_1 (r + R)}{f(J_1)}}$$

$$J f(J) - f(J) \frac{w}{E - Jr} = J_1 f(J_1) - f(J_1) \frac{w_1}{E - J_1 (r + R)}$$

Augenscheinlich ist

$$w : w_1 = v : v_1.$$

Setzt man die einzelnen Werte von v und v_1 ein, so folgt:

$$J . f(J) = J_1 f(J_1).$$

Aus dieser Gleichung geht notwendigerweise hervor, dass $J = J_1$ sein muss, denn wäre z. B. $J_1 >$ oder $< J$, so muss auch $f(J_1) >$ oder $< (J)$ sein und um so mehr das Produkt.

Wir gelangen übrigens auf weit schnellere Weise zum nämlichen Resultat, wenn wir die Zugkraft als das Produkt aus Strom $\times$ Feldintensität betrachten, d. h. $J f(J) = J_1 f(J_1)$ (vergleiche Seite 13).

Man kann also durch Vorschalten von Widerstand allerdings irgendwelche beliebige Geschwindigkeitsänderung erzielen, die Stromstärke bleibt aber stets dieselbe, ob Widerstand vorgeschaltet ist oder nicht.

Beispiel 2. Ist der Traktionskoeffizient = 10, so fängt der Wagen erst bei 10‰ Gefälle von selbst zu laufen an, bis dahin muss dem Motor Strom zugeführt werden. Wollte man nun die Geschwindigkeit mittelst eines Widerstandes reduzieren, so würde derselbe wegen der kleinen Stromstärke viel zu gross ausfallen. Man begnügt sich daher mit einem Widerstande, welcher die Geschwindigkeit in der Ebene oder bei ganz kleinen Gefällen bis vielleicht 5‰ auf das maximale Mass beschränkt und schaltet den Motor, sobald

die Geschwindigkeit in den übrigen Gefällen zu gross wird, einfach zeitweise aus.

Bei 5 ‰ Gefälle haben wir im vorigen Beispiele (Fig. 83) ca. 380 m per Minute und 7,6 Amp. Soll die maximale Geschwindigkeit nicht mehr als 250 m per Minute betragen, so ist die Spannung auf

$$500 \cdot \frac{250}{380} = 330 \text{Volt}$$

zu reduzieren.

Folglich Vorschaltwiderstand

$$= \frac{500 - 330}{7,6} = 22,4\ \Omega.$$

b) Regulierung mittelst Umschalten der Magnete (Sprague)[1].

Bei der Sprague'schen Reguliermethode erhält jede der beiden Magnetspulen 3 Abteilungen, wobei je eine Spule des einen Schenkels mit der gleichen des andern in Serie ist. Durch eine Walze mit Kontakten lassen sich folgende 7 in der nachstehenden Tabelle verzeichnete Schaltungen vornehmen:

Position	Art der Schaltung	Schema a b c	Zahl der aw	Widerstand der Magnetspule
1	Spulen *abc* in Serie		$3\,Jm$	$3\,r$
2	Spule *b* und *c* in Serie, *a* kurzgeschlossen		$2\,Jm$	$2\,r$
3	Spule *b* und *c* in Serie, *a* ausgeschaltet		$2\,Jm$	$2\,r$
4	Spule *a* und *b* parallel und in Serie mit *c*		$2\,Jm$	$1,5\,r$
5	Spule *a* und *b* parallel, *c* kurzgeschlossen		Jm	$0,5\,r$
6	Spule *a* und *b* parallel, *c* ausgeschaltet		Jm	$0,5\,r$
7	Spulen *abc* parallel		Jm	$0,33\,r$

[1]) Die Sprague'sche Reguliermethode wurde bereits 1883 schon von Marcel Deprez angewandt; siehe Lumière Electrique, 11. April 1885.

Anmerkung. Die Widerstandsangaben gelten für die Annahme, dass alle Magnetspulen gleichen Widerstand haben; bei der ursprünglichen Sprague'-schen Anordnung trifft dies nicht genau zu.

Man sieht, die Schaltungen 3 und 6 bringen gegenüber 2 bezw. 5 absolut keine Änderung, weder des Feldes noch des Widerstandes, hervor; die Zahl der Schaltungen von verschiedenen Wirkungen reduziert sich folglich auf 5. Die Positionen 3 und 6 sind indessen unvermeidlich, weil sonst im Apparate beim direkten Übergang auf die Positionen 4 und 7 Kurzschlüsse entstehen würden.

Verglichen mit der reinen Widerstandsregulierung hat diese Methode den Vorteil grösserer Ökonomie; unbequem dagegen werden die vielen Leitungsdrähte, ferner wird der Wicklungsraum infolge der grösseren Isolation nicht genügend ausgenutzt und die Magnete erwärmen sich sehr leicht. Selbstverständlich ist auch bei dieser Methode ein besonderer Anlasswiderstand nicht unentbehrlich.

Der gleiche Zweck wird bei der nachstehenden Methode auf einfachere Weise erreicht.

c) Regulierung durch Parallelschaltung eines Widerstandes zu den Magneten.

Die Eigentümlichkeit derselben besteht darin, dass die Magnetwicklung für eine geringere Stromstärke als die Armatur dimensioniert wird und dementsprechend mehr Windungen erhält. Sowie nun die Stromstärke diese Höhe übersteigt, so entlastet man die Magnete successive durch Parallelschalten von Widerstand.

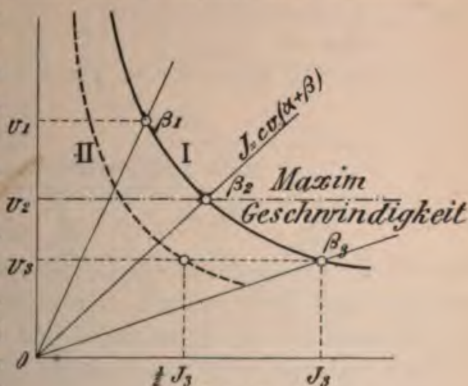


Fig. 84.

In Fig. 84 stelle beispielsweise die Kurve I die Charakteristik eines gewöhnlich gewickelten Motors dar, v_2 sei die maximal zulässige Geschwindigkeit entsprechend einer Steigung β_2. Ist die Steigung kleiner als β_2, so müssen wir die Geschwindigkeit durch einen Vorschaltwiderstand reduzieren, dieser führt aber notwendigerweise einen direkten Voltverlust mit sich. Versieht man dagegen die Magnete mit einer Wicklung von doppelt soviel Windungen, so erhält man die Charakteristik II, deren Abscissen halb so gross wie diejenigen der Kurve I sind. Die Schnittpunkte mit den Strahlen $0\beta_1$, $0\beta_2$, u. s. w. liegen nunmehr viel tiefer, so dass selbst bei einer Steigung

$$\beta_1 = \frac{1}{2}(\beta_2 + \alpha)$$

die maximale Geschwindigkeit nicht überschritten wird.

Der grosse Vorteil dieses Systems besteht in der Einfachheit Regulierapparates, indem der nämliche Widerstand, der zum Anlas dient, auch für das Parallelschalten benutzt werden kann (siehe Fig. 8 Diese Methode wurde vom Verfasser schon 1891 beim elektriscl Tramway in Marseille angewandt und ist seither bei fast sämtlicl neueren Tramanlagen der Maschinenfabrik Oerlikon in Gebrauch.

d) Serie-Parallelsystem.

Bei Wagen, welche mit 2 Motoren versehen sind, ist gegenwär das sogenannte Serie-Parallelsystem (Serie-multiple system) mit versch denen Variationen im Gebrauch.

Die Eigentümlichkeit desselben liegt darin, dass die Motoren nach Bedürfnis hint einander oder parallel schaltet werden, wo sich der Übergang mitt einer der bereits beh delten Schaltungswei bewerkstelligen lässt. bekanntesten und am w testen verbreiteten Re lierapparate mit di Einrichtung sind unst tig diejenigen der Th son-Houston oder Ge ral Electric Co. und Westinghouse Co. O uns in die Konstruktions-Details derselben einzulassen, begnügen uns hier mit einer kurzen Übersicht der graphischen Operatio zur Bestimmung der Stromstärke und Geschwindigkeit auf einer liebigen Steigung. Die verschiedenen Schaltungsweisen beider Syst sind in der nachstehenden Tabelle veranschaulicht.

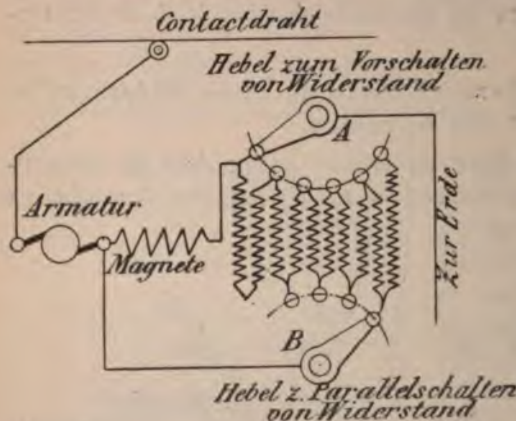


Fig. 85.

Die Analysierung der verschiedenen Positionen ist sehr einf durchzuführen, indem man, von der Kurve einer einzelnen Masch ausgehend, diejenige für die übrigen Schaltungen konstruiert und Schnittpunkte mit der durch die Gleichung (65) gegebenen Gera aufsucht.

Obwohl die einzelnen Schaltungen zum Teil bereits behan wurden, sollen sie hier doch der besseren Übersicht halber noch ein im Zusammenhange aufgeführt werden.

Position	Regulator Westinghouse Co.	General Electric Co.
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

1. **Widerstand im Armaturstromkreis** (Stellung 1, 2 und 3) **und Armaturen in Serie** (Fig. 86).

Kurve I Charakteristik für eine Maschine,

Kurve II Charakteristik für zwei Maschinen in Serie, wird erhalten, indem man die Ordinaten der ersten durch 2 dividiert.

R = Vorschaltwiderstand.

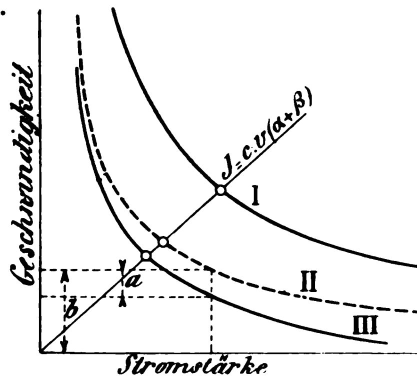


Fig. 86.

$$R = \frac{E}{J} \cdot \frac{a}{b} \cdot \tag{66}$$

2. **Schaltung 4 und 5** (Westinghouse) (Fig. 87).

I Kurve eines einzelnen Motors,

II und III „ jedes einzelnen Motors bei Serieschaltung.

$$E . \frac{a}{b} J_2 + E \frac{b-a}{b} . J_1 = c\, v (\alpha + \beta) . E.$$

Ferner muss

$$\frac{a}{b} = \frac{b-a}{X}$$

sein, oder

(67) $$X = \frac{b(b-a)}{a}.$$

Diese Formel dient zur Bestimmung von J_2 und J_1. Für R gilt dann

(68) $$(J_1 - J_2) R = \frac{E a}{b}.$$

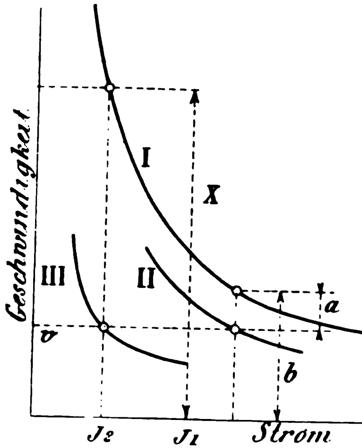


Fig. 87.

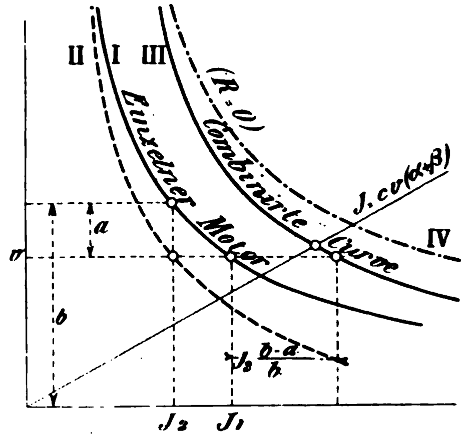


Fig. 88.

Am schnellsten gelangt man zum Ziele, wenn man die Kurven für einen einzelnen und 2 Motoren in Serie aufzeichnet und zwischen diesen beiden Kurven annimmt, aus denen a und b abgelesen und X und J_1, wie oben gezeigt, bestimmt werden kann. Es verbleibt also nur noch R zu berechnen. Letzteres ist für eine bestimmte Schaltung 4 oder 5 konstant, die versuchsweise angenommenen Kurven müssen also demgemäss modifiziert werden.

Benutzt man wiederum die Gleichung (65) für die Strahlenbündel, so ergeben in diesem Falle die Schnittpunkte mit dem Motor ohne Widerstand, d. h. mit Kurve II, die gesuchten Geschwindigkeiten und Stromstärken.

3. Schaltung 8 und 9 (Westinghouse) (Fig. 88).

I Kurve eines einzelnen Motors,
II „ „ „ „ mit Widerstand in Serie,
III Kurve beider Motoren parallel mit „ parallel,
IV „ „ „ „ ohne „

$$R = \frac{E}{J_2} \cdot \frac{a}{b}.$$

Aus dieser Gleichung wird die Kurve II berechnet unter zu Grundelegung eines bestimmten Widerstandes R, dessen ursprüngliche Annahme je nach Verhältnissen zu modifizieren ist. Die Kurve III wird durch Addition von J_1 urd J_2 erhalten.

Hat man schliesslich sämtliche kombinierte Kurven auf diese Weise aufgezeichnet (Fig. 89), so erhält man leicht ein anschauliches Bild der Wirkungsweise der verschiedenen Schaltungen auf allen möglichen Steigungen. Man kann sich auch so Rechenschaft ablegen, wie gross die Geschwindigkeitsveränderungen je nach der Steigung und Schaltung sind, bei welchen Übergängen Stösse vorkommen u. s. w.

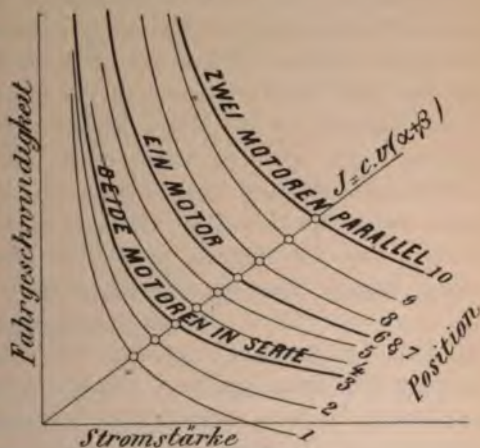


Fig. 89.

Anmerkung 1. Werden 2 Motoren pro Wagen angewendet, so ist ein Hauptaugenmerk darauf zu richten, dass stets 2 Motoren von genau gleichen magnetischen Eigenschaften gewählt werden. Diese Vorsicht ist um so ebergeboten, wenn die Bürsten vor dem Regulator untereinander verbunden sind. Stellen wir uns beispielsweise einen Betrieb mit zwei 15 HP. Motoren ($E = 500$ Volt, $J = 26$ Ampère) vor und es sei der remanente Magnetismus in einem Motor 3 %, im andern 6 % — diese Differenz kann auch, ganz abgesehen vom Material, durch ungleiche Ausbohrung u. s. w. hervorgerufen sein — ferner sei der Ohm'sche Verlust in einer Armatur 3 %, was 0,58 Ohm entspricht, so wird beim Thalwärtsfahren eine Spannung von

$$(0{,}06 - 0{,}03) \,.\, 500 = 15 \text{ Volt}$$

erzeugt, so dass ein Strom von

$$\frac{15}{0{,}58 \,.\, 2} = 13 \text{ Ampère}$$

entsteht.

Durch Versuche wurde übrigens nachgewiesen, dass dieser Strom unter ungünstigen Verhältnissen sogar grösser ausfallen kann, als der normale Maschinenstrom. Dies hätte nun nichts auf sich, insofern als die Energie nicht von der Leitung aus geliefert wird, allein es ist zu bedenken, dass sich die Motoren bedeutend mehr erwärmen, indem die so wichtige Periode der Abkühlung während den Thalfahrten ausfällt.

Anmerkung 2. Beim Entwurfe von Kraftstationen für Traktionszwecke kommt ausser dem mittleren Stromverbrauch hauptsächlich der maximale Strom in Betracht. Leider giebt es keine Formel, welche den Anlassstrom mit absoluter Sicherheit zu berechnen gestattet, dagegen führt die nachstehende, meines Wissens zuerst von Oscar T. Crosby und Louis Bell (Electric Railway in

Theory and Practice) angegebene empirische Formel zu einigermassen richtigen Resultaten.

(69) $$\text{Anlassstrom} = J \cdot \frac{3\alpha + \beta}{\alpha + \beta}.$$

J = Strom auf der Steigung, für welche der Anlassstrom zu berechnen ist.

In der Ebene ist $\beta = 0$, die Anlassstromstärke ist daher 3mal so gross, als wenn der Wagen im Lauf ist.

Diese Formel zeigt auch eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsresultaten, welche vor einigen Jahren von der Maschinenfabrik Oerlikon auf der Linie Zürich-Hirslanden angestellt wurden.

Die Nebenschlussmaschine.

Was die Nebenschlussmaschine als Motor anbetrifft, so haben wir bei Behandlung derselben als Generator gesehen, dass sie, abgesehen von einem kleinen Verluste, eine nahezu konstante Spannung beibehält, welches auch die Variationen in der Stromentnahme sein mögen. Umgekehrt würde sie als Motor betrieben bei jeder beliebigen Belastung innerhalb den normalen Grenzen mit ziemlich der gleichen Tourenzahl laufen, dies natürlich auch dann noch, wenn an der gleichen Leitung noch andere Maschinen zu arbeiten haben. Im ferneren bietet sie den Vorteil, dass die Magnete auch beim Leerlauf immer gleich stark gesättigt sind, so dass ein „Durchbrennen“ der Maschine durchaus ausgeschlossen ist. Zum Anlaufenlassen eines solchen Motors bedarf es eines in den Armatur-Stromkreis eingeschalteten, wenn auch nur verhältnismässig sehr geringen Additional-Widerstandes, weil ohne diesen die Primär-Dynamo beim Einschalten eines Nebenschlussmotors, dessen Armatur im Ruhestand sich befindet, einfach kurz geschlossen und entmagnetisiert würde. Das gleiche kann auch bei zu grosser Belastung des Motors eintreten.

Die Anwendung eines solchen Anlaufwiderstandes ist aber auch dann noch unerlässlich, wenn die Spannung des Generators nicht sinken könnte, weil der Widerstand der Armatur des Motors allein gegenüber demjenigen der Magnetwicklung so klein ist, dass durch die letztere überhaupt fast kein Strom mehr geht, wodurch die Maschine trotz des grösseren Anlassstromes nicht die nötige Kraft erhält, um anlaufen zu können.

Anmerkung. Ein Kniff, der manchmal angewandt wird, um Nebenschlussmotoren ohne Widerstand angehen zu lassen, besteht darin, dass man eine der Bürsten für eine kurze Zeit abhebt, bis die Magnete vollkommen magnetisch geworden sind, worauf man sie wieder aufliegen lässt, nachdem man die Armatur vorher in möglichst schnelle Rotation versetzt hat.

Solche Manöver sind verwerflich, weil sie leicht zu Drahtbrüchen Veranlassung geben; auch wird der Kommutator und die Bürsten dadurch beschädigt.

Soll die Geschwindigkeit der Nebenschlussmotoren verändert werden, so kann das mittelst des bereits erwähnten Widerstandes geschehen,

der entsprechend gewählt werden muss, oder auch durch Hintereinander- oder Parallelschalten von Magnetwindungen. Die Wirkung äussert sich hier aber umgekehrt. Die Wicklung sei beispielsweise in 6 Abteilungen geteilt und es bedeute

E die Spannung an den Bürsten,
r den Widerstand einer Abteilung, und
m die Zahl der Windungen pro Abteilung,

so ist für

sämtliche Spulen in Serie: $a w = \frac{E}{6 r} \cdot 6 m = \frac{E}{r} \cdot m;$

3 und 3 Spulen in Serie: $a w = \frac{E}{\frac{3}{2} \cdot r} \cdot 3 m = 2 \frac{E}{r} \cdot m;$

3 Gruppen à 2 Spulen: $a w = \frac{E}{\frac{2}{3} \cdot r} \cdot 2 m = 3 \frac{E}{r} \cdot m;$

alle Spulen parallel: $a w = \frac{E}{\frac{1}{6} \cdot r} \cdot m = 6 \frac{E}{r} \cdot m.$

Der Motor wird also bei der ersten Schaltung am schnellsten und bei der Schaltung (4) am langsamsten laufen.

Es liegt ausser allem Zweifel, dass die Anwendung von Nebenschlussmaschinen (als Generator sowohl als auch als Motor) in vielen Fällen entschiedene Vorteile besitzt, dies besonders, wenn die Motoren an das Beleuchtungsnetz angeschlossen werden sollen und eine bei allen Belastungen konstante Tourenzahl gefordert wird, wie z. B. für den Antrieb von Werkzeugmaschinen u. s. w. Der Nebenschlussmotor kann aber auch dann noch angewandt werden, wenn der Verlust in der Leitung erheblicher wird, d. h. wenn die Bürstenspannung ziemlich variiert, indem er ziemlich unempfindlich gegen Spannungsschwankungen ist. Vollständig unempfindlich könnte er, soweit dies mit Rücksicht auf einen funkenlosen Gang zulässig ist, gemacht werden, wenn die Magnetverhältnisse der Sekundärmaschine derart gewählt werden, dass dieselbe beim Leerlauf, also dann, wenn der Spannungsverlust beinahe gleich Null wird und Primär- und Sekundär-Maschine die gleiche Spannung besitzen, noch mit einem Sättigungsgrade läuft, bei welchem Proportionalität zwischen Erregerstrom und Induktion herrscht. Der Beweis hierfür kann leicht erbracht werden:

$$v = c \cdot \frac{E}{\Phi}, \text{ oder da } \Phi = c_1 \frac{E}{R}$$

ist

$$v = c_2 R.$$

Die Erfahrung zeigt auch, dass das geringste Gewicht einer Dynamo-Maschine nur unter Anwendung jenes Sättigungsgrades erreichbar ist, welcher dem sogenannten Knie der Magnetisierungskurve, d. h. jenem Punkte entspricht, in welchem die Proportionalität zwischen Induktion und Erregung eine mässige Abnahme erleidet. Dies können wir aber leicht dadurch erreichen, dass wir zur Primär-Dynamo eine Kompound-Maschine, zum Motor eine Nebenschluss-Maschine wählen, wobei wir die Spannung an der Sekundär-Maschine durch sogenanntes Überkompoundieren konstant zu erhalten suchen.[1]) Es mag vielleicht noch als ein weiterer Vorteil der Kraft-Übertragung mit Kompound-Dynamos als Primär-Maschinen gegenüber derjenigen mit reinen Nebenschluss-Maschinen der Umstand hervorgehoben werden, dass der Generator durch zu starke Belastung des Motors nicht entmagnetisiert werden kann. Aus letzterem Grunde werden Tramway-Generatoren mit wenigen Ausnahmen kompound gewickelt.

Anlassapparate für Nebenschlussmotoren.

Nebenschlussmotoren erfordern eine ganz besonders gute Isolation der Magnete, um beim Ausschalten nicht Schaden zu leiden. Dieser Übelstand kann jedoch leicht durch die nachstehende Anordnung vermieden werden, welche der Verfasser bereits am 11. März 1892 für einen transportablen Motor, Nebenschlussmotor der Maschinenfabrik Oerlikon (Zeichn. 2945), entwarf. Wir benutzen hierzu einen gewöhnlichen Widerstandsregulator wie für einen Seriemotor, den wir in nebenstehender Weise (Fig. 90) mit den Klemmen des Motors verbinden. Bei dieser Schaltung bilden die Magnete M auch nach dem Ausschalten mit der Armatur A und den Anlasswiderstand R einen geschlossenen Stromkreis, durch welchen der Extrastrom seinen Verlauf nimmt. Das Ausschalten erfolgt daher ohne die geringste Funkenbildung.

Bei der letzten Position (7) ist, wie ersichtlich, aller Widerstand vor die Magnete geschaltet, die Tourenzahl wird jedoch trotzdem nur unwesentlich beeinflusst, wie aus folgender Überlegung hervorgeht: Es sei der Widerstand R so bemessen, dass der Anlassstrom nur gleich dem halben normalen Strom werden kann und es betrage ferner der Magne-

---

[1]) Die frühere für Nebenschlussgeneratoren ausgesprochene Bedingung, dass die Magnete mit Rücksicht auf einen stabilen Gang ziemlich gesättigt sein müssten, verliert seine Bedeutung insofern für Motore, als hier die Spannung in der Leitung konstant gehalten wird, so dass der Erregerstrom stets der Gleiche bleibt. Nichtsdestoweniger ist eine gewisse Sättigung im Hinblick auf das Gewicht ratsam und für die Armatur wegen der Funkenbildung sogar geboten.

tisierungsstrom $3\frac{1}{2}\%$ vom Hauptstrome, dann ist mit Vernachlässigung des Armaturwiderstandes:

a) $$R = \frac{E}{0{,}5\,\mathfrak{J}}$$

b) $$\frac{E}{R} = i = 0{,}035\,\mathfrak{J} \text{ woraus } r = \frac{E}{0{,}035\,\mathfrak{J}}$$

c) $$i' = \frac{E}{R+r} = \frac{0{,}035 + 0{,}5}{0{,}035\,.\,0{,}5}\,.\,\mathfrak{J} = 0{,}0327\,\mathfrak{J}.$$

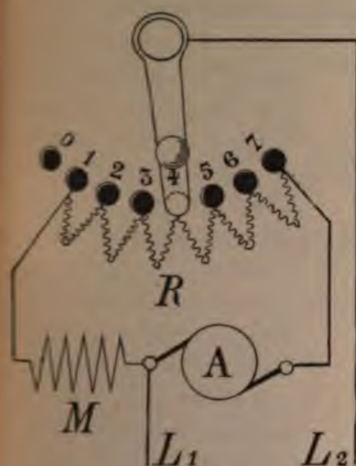


Fig. 90.

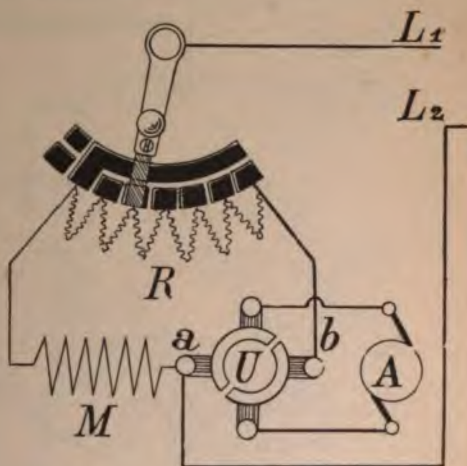


Fig. 91.

Die Erregung wird daher um kaum 7% geschwächt und die Tourenzahl um 2% erhöht.

Ähnliche Apparate wurden auch von Menges (E.T.Z. Nr. 48, 1897) und Cutler in Chicago (Engl. Pat. 13523, Juni 1897) vorgeschlagen. Beim Apparate von Menges (Fig. 91) sind 2 Contakte angebracht. Dafür bleibt der Magnetwiderstand für alle Lagen unverändert. Wünscht man den Motor reversierbar zu gestalten, so wird nach Menges Vorschlag der Umschalter an die Klemme *a* und *b* angeschlossen und so disponiert, dass für eine beliebige Lage der Stromkreis nie unterbrochen wird.

Fig. 92 zeigt schliesslich einen neueren Anlass- und Regulierapparat des Verfassers für Nebenschlussmotoren. Die Geschwindigkeitsregulierung erfolgt halb durch einen Hauptstromwiderstand R_1 halb durch einen Nebenschlusswiderstand R_2. Auch hier sind Armatur A und Magnete M stets auf einen grossen Widerstand kurz geschlossen, ein Funken kann daher nicht auftreten.

C. Vergleichung der Drehrichtung bei Generatoren und Motoren.

Generatoren. Es wurde bereits auf Seite 6 angegeben, wie die Stromrichtung in Leitern zu bestimmen sei, die sich in einem magnetischen Felde senkrecht zu den Kraftlinien bewegen.

Es soll nun nachgewiesen werden, dass die Magnetwicklung einer Maschine in ganz bestimmter Weise mit der Armatur verbunden werden muss, um für eine gegebene Drehrichtung überhaupt einen Strom zu erhalten:

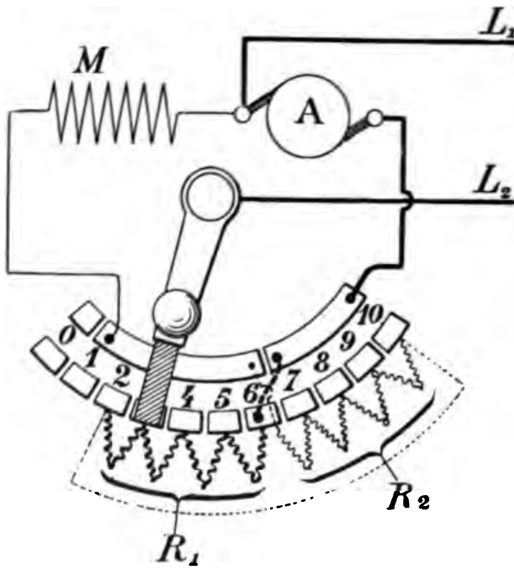


Fig. 92.

Maschinen, die zum ersten Mal laufen, müssen in der Regel zuerst eine kurze Zeit erregt werden, da die Magnetschenkel gewöhnlich noch keine ausgeprägten Pole besitzen. Ist dies aber einmal geschehen, so bleibt auch, nachdem die Erregung aufgehört hat, doch in den Magneten für immer ein gewisser remanenter Magnetismus zurück, der allerdings sehr gering, aber immerhin stark genug ist, dass in der Armatur ein kleiner Induktionsstrom entstehen kann.

Hat man nun die Schaltung der Magnetwicklung richtig gewählt, so wird dieser anfangs nur ganz schwache Strom den remanenten Magnetismus verstärken. Dadurch steigt aber auch der Induktionsstrom; der stärkere Erregerstrom erzeugt eine grössere Linienzahl und so fort, bis ein gewisser Gleichgewichtszustand eingetreten ist, der einem bestimmten Sättigungsgrade entspricht.

Waren dagegen die Verbindungen unrichtig, so sucht der nun entstehende Armaturstrom die bereits vorhandenen Pole umzukehren. Dies ist nur möglich, indem die Magnete zuerst bis auf Null entmagnetisiert werden. Sobald aber das Feld gleich Null ist, so fällt auch der Armaturstrom auf Null herab, das heisst, die Maschine kann keinen Strom mehr geben.

Darf also die Drehrichtung nicht geändert werden, so bleibt nichts anderes übrig, als die Verbindungen mit den Spulen zu kreuzen, oder was unter Umständen noch besser ist, die Spulen selbst miteinander zu vertauschen (nicht bei allen Maschinentypen von Erfolg).

Es soll hier noch auf einige Eigentümlichkeiten aufmerksam gemacht werden, die bei zu wenig Vorsicht leicht Unannehmlichkeiten bereiten können.

Vollständig gleich gewickelte Maschinen mit gleichen Drehrichtungen werden, je nachdem sie erregt wurden, verschieden gerichteten Strom erzeugen.

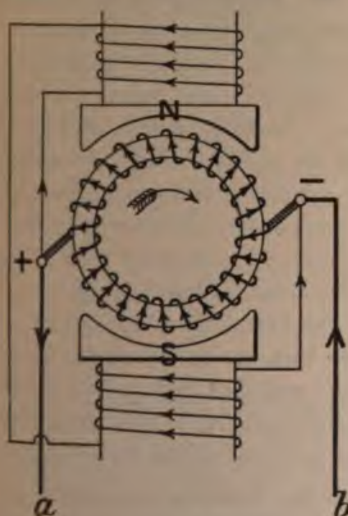


Fig. 93 *a*.

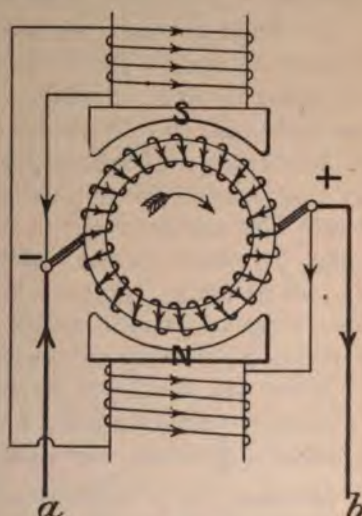


Fig. 93 *b*.

Es soll dies nun an einer Nebenschlussmaschine gezeigt werden, obwohl der Satz auch für die anderen Wicklungsarten gilt.

Nehmen wir an, die Maschine (Fig. 93 *a*) sei derart erregt worden, dass oben ein Nordpol und unten ein Südpol entsteht. Ferner soll bei einer bestimmten Drehrichtung in der Armatur ein Strom so induziert werden, dass *a* die positive Klemme ist. Verbindet man also die Magnetspulen, wie die Figur 93 *a* zeigt, so kann sich ein starkes Feld bilden und die Maschine giebt Strom, der von der Klemme *a* ausgeht. Wäre dagegen die Maschine umgekehrt erregt worden (Fig. 93 *b*), so dass der Südpol oben und der Nordpol unten ist, so hat natürlich auch der Armaturstrom eine umgekehrte Richtung, d. h. *b* wird positive und *a* negative Klemme.

Betrachten wir den Stromlauf in der Magnetspule (Fig. 93 *b*), so stellt sich heraus, dass auch der Erregerstrom oben einen Südpol und

unten einen Nordpol zu bilden sucht, die Maschine kann also richti funktionieren.

Bei reiner Glühlampenbeleuchtung bleibt es sich gleich, in welch Richtung der Strom fliesse, wo dagegen Maschinen für Beleuchtun mit Bogenlampen, Galvanoplastik oder zum Laden von Akkum latoren u. s. w. verwendet werden, müssen die Pole vorerst geprüft werde desgleichen auch, wenn Maschinen parallel geschaltet werden solle

Es mag bei dieser Gelegenheit bemerkt werden, dass bekannte massen die Dauer von Glühlampen erhöht werden kann, wenn ma die Pole der Maschine von Zeit zu Zeit umwechselt; doch wird hiervo in der Praxis gewöhnlich keine oder sehr wenig Anwendung gemach

Zur Prüfung können die bekannten Spezialapparate (Polsucher vo Berghausen, Reagenzpapier oder dergl.) benutzt werden. Ist gerade ei Bogenlampe zur Hand, so schalte man dieselbe in den Stromkreis ein u unterbreche nach einer Weile den Strom. Diejenige Kohle, welche na dem Ausschalten am längsten glüht, ist die positive. Sind Nebenschlu oder Kompoundmaschinen parallel zu schalten, so können die glei namigen Pole mittelst zweier in Serie geschalteter Glühlampen gefund werden. Zu diesem Zwecke verbindet man versuchsweise eine Klem der einen Maschine mit einer beliebigen der anderen Maschine. I beiden übrigen Klemmen werden mit den Glühlampen verbunden. I der richtigen Schaltung geht natürlich kein Strom durch die Lamp

Wenn sich Maschinen längere Zeit auf dem Transporte befind so können sie durch die vielen Erschütterungen leicht ihren remanent Magnetismus verlieren. Zur Neuerung genügen einige Daniellelemen

Anmerkung. Bei jeder Maschine, welche das Versuchslokal verlässt, soll die Klemmen genau angegeben sein; es ist dies eine geringe Arbeit, welc dem Installateur oder Monteur manche Unannehmlichkeit und vieles Ko zerbrechen erspart.

Motoren. Aus dem soeben Gesagten, wie auch aus der bere auf S. 6 und 14 angegebenen Regel geht hervor, dass die Drehrichtung v Motoren, bei welchen der Strom sowohl in Magnet als Armatur d gleiche, oder in beiden Teilen entgegengesetzte Richtung als im Generat hat, umgekehrt derjenigen des Generators ist.

Bei gleichgewickelten Seriemaschinen ist daher die Drehrichtu beim Motor und Generator immer verschieden. Nebenschlussmotor laufen dagegen in der gleichen Richtung wie die Primärmaschine.

Es lassen sich hieraus noch einige weitere Schlüsse ziehen:

1. Seriemaschinen geben, als Generator in der gleichen Richtu gedreht, wie sie als Motoren laufen, keinen Strom, weil d allerdings entstehende und in umgekehrter Richtung fliessen Strom die Pole umzukehren sucht.

Bei einer Kraftübertragung mit Seriemaschinen, wo die Sekundärmaschine z. B. mit einer Dampfmaschine auf die gleiche Transmission zu arbeiten hat, darf also die Primärmaschine auch bei geschlossenem Stromkreise ohne Bedenken abgestellt werden, während die Sekundärmaschine an der Transmission weiter läuft.

2. Nebenschlussmaschinen dagegen geben, durch mechanische Kraft im gleichen Sinne gedreht, wie sie als Motor laufen, einen entgegengesetzt gerichteten Strom. Würde man daher bei der genannten Kraftübertragung statt der Seriemaschinen Nebenschluss-

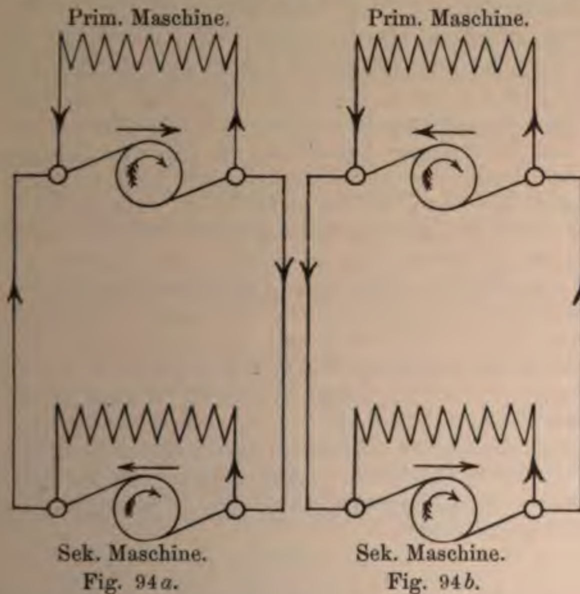


Fig. 94*a*. Fig. 94*b*.

Maschinen verwenden, so müssste der Strom zuerst unterbrochen werden, bevor man die Primärmaschine abstellen darf, weil sonst letztere durch den aus der Sekundärmaschine kommenden entgegengesetzten Strom weiter getrieben würde (siehe Fig. 94 *b*). Aus dem gleichen Grunde darf man bei einer Beleuchtung, wo zwei oder mehr durch Dampfmaschinen separat angetriebene Nebenschlussmaschinen (oder auch Kompoundmaschinen) parallel geschaltet sind, eine der Dampfmaschinen erst dann abstellen, wenn die betreffende Dynamo vorerst aus dem Stromkreise ausgeschaltet ist.

3. Um die Drehrichtung eines Motors zu ändern, genügt es, den Strom entweder in den Magnetspulen, oder in der Armatur umzukehren. Hiervon wird vor allem bei Tramwaymotoren

Anwendung gemacht, wo es sich aus gewissen Gründen empfiehlt, den Armaturstrom umzukehren, während der Strom in den Magnetspulen immer in der gleichen Richtung zirkuliert. Auf diese Weise erhalten wir nämlich der Maschine immer einen ziemlich starken remanenten Magnetismus von gleich bleibender Polarität. Wollen wir nun den Motor selbst als Bremse benutzen, so schalten wir denselben aus dem Leitungsnetze aus und schliessen ihn durch einen Widerstand kurz, während wir gleichzeitig den Umschalter auf die entgegengesetzte Fahrrichtung einstellen.

Die Bremswirkung ist eine ausgezeichnete, oft nur zu energische. Sie äussert sich jedoch nur so lange, bis der Wagen eine gewisse minimale (kritische) Geschwindigkeit erreicht hat (siehe folgendes Kapitel).

Anmerkung. Ein eigentümlicher Fall von Betriebsstörung bei einer Kraftübertragung mit gleichzeitiger Beleuchtung ist folgender: An einem gewissen Orte war als Primärdynamo eine Kompoundmaschine aufgestellt. Dieselbe hatte gleichzeitig den Strom für die Beleuchtung, als auch für einen Nebenschlussmotor, der direkt mit einer Hilfsdampfmaschine auf die gleiche Welle anzutreiben hatte, zu liefern. Da der Regulator der Dampfmaschine ziemlich schlecht und erst bei einer etwas höhern Tourenzahl funktionierte, so kam es öfters vor, dass die Dampfmaschine etwas schneller als normal lief, wodurch natürlicherweise auch eine Vermehrung über die normale Tourenzahl der Sekundärmaschine eintrat. Dadurch aber verwandelte sich der Motor sofort in einen Generator und schickte einen Strom von entgegengesetzter Richtung durch die Seriewicklung der Primärdynamo, wodurch ein Fallen der Spannung und gleichzeitig ein Flackern der Lampen verursacht wird. Diesem Übelstande konnte leicht dadurch abgeholfen werden, dass man in den Nebenschluss der Sekundärmaschine einen Widerstand einschaltete, wodurch der Motor überhaupt etwas schneller laufen musste.

D. Elektrische Bremsung.

Das Prinzip der elektrischen Bremsung mit Benutzung der Motoren als Generatoren, die auf einen Widerstand arbeiten, ist längst bekannt. Wenn dasselbe dessenungeachtet im Tramwaybetriebe noch keine grosse Verbreitung gefunden hat, so ist das hauptsächlich dem Umstande zuzuschreiben, dass es bei den äusserst beschränkten Dimensionen, welche für den Geschwindigkeits-Regulator und Widerstand zur Verfügung stehen, beinahe unmöglich ist, noch genügend viele Abstufungen für die Bremse zu erhalten, um in jedem Gefälle und bei beliebiger Belastung des Wagens die erforderliche Geschwindigkeit zu erreichen. Ist aber der Widerstand zu klein, so fahren die Wagen, besonders wenn sie wenig belastet sind, zu langsam. Eine weitere, oft verderb

lich wirkende Eigenschaft der elektrischen Bremsen besteht noch darin, dass die Spannung der Maschine, sofern die Bremse bei zu grosser Geschwindigkeit in Thätigkeit gesetzt wird, öfters bedeutend über das normale Mass hinausgeht. Der Verfasser selbst hat bei Tramwaymotoren von 500 Volt nicht selten Stromstärken abgelesen, welche bei dem vorhandenen Widerstande über 1100 Volt ergaben. Selbstverständlich wird dadurch die Isolation sehr in Mitleidenschaft gezogen. Wenn man also auf der einen Seite eine Ersparnis an Bremsklötzen anstrebt, riskiert man andererseits, den doppelten Betrag für Neubewicklungen von Armaturen auszulegen u. s. w. Dessenungeachtet giebt es gewisse Fälle, wo die elektrische Bremsung, rationell angewandt, gewisse Vorteile besitzt. Ein solcher Fall bietet sich beispielsweise, wenn die Linie nach einer Richtung fortwährend grosse konstante Gefälle besitzt, wie z. B. die elektrische Bahnanlage Grütsch-Mürren, ausgeführt von der Maschinenfabrik Oerlikon, bei welcher die elektrische Bremsung seit 1889 in Anwendung steht.

Wir wollen nun den Vorschaltwiderstand bestimmen, welcher für eine bestimmte Wagenbelastung, Geschwindigkeit und Gefälle notwendig ist.

Die vom Motor als Generator abzugebende Arbeit ist durch die Gleichung

$$JE = \frac{9{,}81 \, . \, v P (\beta - \alpha) \zeta}{60} \tag{70}$$

bestimmt. Während nun ζ mit etwelcher Sicherheit abgeschätzt werden kann, sind v, J und E unbekannt.

Für E besteht jedoch die bekannte Beziehung

$$E = \frac{v\,a}{D\pi} \cdot \frac{N\,\Phi}{60 \, . \, 10^8} \cdot \frac{p}{p_1} (1 - \varepsilon).$$

Damit wir die gewöhnliche Geschwindigkeitskurve des Motors (Fig. 82) benutzen können, ist zu bedenken, dass dort

$$v_1 = \frac{E_1 \, . \, 60 \, . \, 10^8 \, . \, p_1}{\Phi \, . \, N \, . \, p} \cdot \frac{D\pi}{a} (1 - \varepsilon).$$

Durch Multiplikation der beiden Gleichungen folgt daher

$$v_1 = v \cdot \frac{E_1}{E} (1 - \varepsilon)^2,$$

oder, indem wir den Wert von E aus der Gleichung (70) substituieren,

$$v_1 = E_1 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\zeta} \cdot \frac{60 \, . \, J}{9{,}81 \, P (\beta - \alpha)}. \tag{71}$$

Für eine approximative Berechnung genügt es, $(1 - \varepsilon)^2 = \zeta$ zu setzen, indem der Widerstand schliesslich doch etwas grösser disponiert wird, als nach der Rechnung erforderlich wäre. Für die übliche Spannung $E = 500$ Volt wird daher approximativ

$$v_1 = 3000 \frac{J}{P(\beta - \alpha)}. \tag{72}$$

Die Bedeutung dieser Gleichung soll an einem Beispiele gezeigt werden.

Beispiel. Fig. 95 giebt die Charakteristik eines 30 HP Tramwaymotors der Westinghouse Co. Dieser Motor sei auf einen Wagen montiert von 8 Tonnen Bruttogewicht.

Man berechne nun den Vorschaltwiderstand derart, dass der vollbelastete Wagen auf einem Gefälle von 49‰ mit 240 m per Minute läuft. Spannung = 500 Volt.

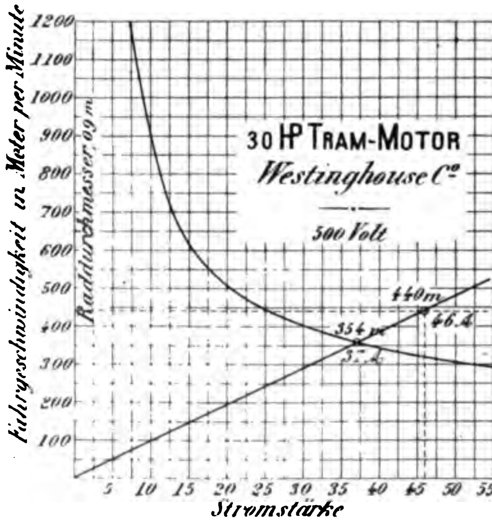


Fig. 95.

Ganz approximativ ist

$$P(\beta - \alpha) = 8(49 - 10) = 312.$$

Daraus ergiebt sich für ein beliebiges J, z. B. 46 Amp.

$$v_1 = 3000 \cdot \frac{46}{312} = 440 \text{ m}.$$

Zeichnet man diese Kurve auf, so erhält man als Schnittpunkt mit der Geschwindigkeitskurve die wirkliche Stromstärke $J = 37$ Ampère.

ζ mag zu 0,83 (83 %) angenommen werden, dann ist nach Gleichung (70)

$$E = \frac{1}{37} \cdot \frac{9{,}81 \cdot 240 \cdot 312 \cdot 0{,}83}{60}$$
$$= 280 \text{ Volt}.$$

Als Kontrolle wäre nun zu untersuchen, ob diese Spannung bei 37 Ampère thatsächlich erreicht wird. Der 37 Ampère entsprechende Wert von v_1 ist nach der Kurve 354 m. Folglich muss, wie oben gezeigt,

$$E = E_1 \cdot \frac{v}{v_1} \cdot (1 - \varepsilon)^2$$

sein.

Nach den Abmessungen der Maschine ist $\varepsilon = 0{,}08$, folglich:

$$E = 500 \cdot \frac{240}{354} \cdot 0{,}922^2 = 288 \text{ Volt}.$$

Die Rechnung stimmt also ziemlich genau. Wir nehmen das arithmetische Mittel $E = 284$. Es bleibt also nur noch der Widerstand zu berechnen, und zwar ist

$$R = \frac{284}{37} = 7{,}7 \text{ Ohm}.$$

E. Umrechnung der Magnetwicklung bereits einmal ausgeführter Maschinen.

Wir setzen zunächst voraus, die Ausbohrung der Magnete bleibe unverändert. Wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn die Ausbohrung vergrössert wird, werden wir später behandeln.

Es wurde schon in einem früheren Kapitel gezeigt, in welcher Weise die Berechnung der Armatur einer bereits einmal ausgeführten oder neu zu konstruierenden Maschine für irgendwelche elektrische Leistung durchzuführen ist. Hierbei legten wir unseren Berechnungen einen bestimmten magnetischen Sättigungsgrad B_l in der Luft zu Grunde.

Die weitere Aufgabe besteht nun darin, die Magnetwicklung derart zu bestimmen, dass jene Linienzahl B_l resp. Φ erreicht wird.

Hierzu bedürfen wir bloss die Magnetisierungskurve des gleichen, bereits für irgendwelche andere elektrische Verhältnisse ausgeführten Maschinenmodelles, und mögen die nachstehenden Angaben einigen Anhaltspunkt bieten über die Art und Weise, wie solche Maschinen für den genannten Zweck am besten zu probieren sind.

Ist die betreffende Maschine eine Nebenschlussmaschine, und steht kein anderer Strom zur Erregung der Magnete zur Verfügung, so schalten wir in den Nebenschluss einen sehr grossen variablen Widerstand, sowie ein genaues Ampère-Meter ein und treiben die Armatur mit konstanter, möglichst hoher Tourenzahl an, wobei wir jedoch aus der Armatur keinen Strom entnehmen. Die Erhöhung der Tourenzahl hat den Zweck, auch höhere Sättigungsgrade messen zu können. Im übrigen ist jedoch eine separate Erregung vorzuziehen, falls es die Umstände erlauben. Schalten wir nun successive Widerstand aus und messen wir die jeweiligen verschiedenen, durch den Nebenschluss fliessenden Ampère, so geben die an den Bürsten der Maschine erhaltenen Volt, oder noch besser die Werte von Φ als Ordinaten, die entsprechenden Ampère-Windungen als Abscissen aufgetragen, die verlangte Magnetisierungskurve dieser Maschine.

Eine weitere Versuchsreihe wird derart vorgenommen, dass man die Maschine bei konstanter Erregung auf einen variablen Widerstand arbeiten lässt und für jede Belastung die entsprechende Klemmenspannung ermittelt. Die Erregerstromstärke wird zu diesem Zwecke derart gewählt, dass bei voller Belastung angenähert die normale Klemmenspannung erreicht wird. Man kann diesen Versuch auch derart anstellen, dass man den Erregerstrom gleichzeitig mit dem Hauptstrom ändert und eine konstante Klemmenspannung beibehält. Diese zweite Methode erfordert etwas mehr Zeit, ist aber sehr bequem für die nachträgliche Bestimmung des Regulierwiderstandes.

Betrachten wir nun zwei Punkte mit gleicher Erregung, so zeigt sich, dass der Spannungsabfall stets grösser ist, als der blosse Voltverlust ergeben würde. Wir können diesen suplementären Spannungsabfall als das Produkt der Stromstärke multipliziert mit einem fiktiven Armaturwiderstand auffassen. Dieser fiktive Armaturwiderstand ist allerdings keine konstante Grösse. Es giebt Maschinen, bei welchen derselbe mit zunehmender Magnetsättigung abnimmt; andere Maschinen weisen dagegen ein umgekehrtes Verhältnis auf, wie die nachstehende Zusammenstellung dreier Maschinen zeigt.

	Stromstärke (Armatur)	Scheinbarer Widerstand
3 Kilowatts	300 Ampère	0,0021
	900 „	0,00178
18 „	50 „	0,048
	150 „	0,04
50 „	150 „	0,04
	450 „	0,06

Im allgemeinen ist der fiktive Widerstand keinen allzugrossen Änderungen unterworfen, so dass es unter allen Umständen zulässig ist, denselben bei gleichbleibender Erregung und nicht sehr weit auseinander liegenden Stromstärken als konstant zu betrachten.

Für eine Seriemaschine führen wir die Versuche ebenfalls ganz ähnlich durch, und zwar erstens bei separater Erregung der Magnete, wobei aus der Armatur kein Strom entnommen wird, und zweitens, indem wir die Maschine auf einen Widerstand arbeiten lassen.

Bei Kompoundmaschinen schliesse man die dicke Wicklung kurz; im übrigen gilt das für Nebenschlussmaschinen Gesagte.

Wenn es die Konstruktion der Dynamomaschine oder anderweitige Verhältnisse nicht gestatten, die Dynamo mittelst Riemen oder dergleichen anzutreiben, so kann dieselbe an eine Stromquelle von konstanter Spannung eingeschaltet und als Motor laufen gelassen werden; in letzterem Falle tragen wir nicht die Spannung selbst, sondern die aus der Spannung ausgerechnete totale Induktion Φ als Ordinaten auf. Um den Armaturstrom variieren zu können, müssen wir hier die Maschine auf irgend eine Weise belasten, und kann dies unter Umständen dadurch geschehen, dass wir mit derselben eine zweite Dynamo antreiben, welche wir auf einen variablen Widerstand arbeiten lassen.

Es sei bei dieser Gelegenheit noch auf eine Methode hingewiesen, welche seinerzeit in der Elektrotechnischen Zeitschrift vom Juli 1888 erschien und angiebt, wie Dynamomaschinen, deren Kraftbedarf die

verfügbare Leistung der Betriebsmaschine bis auf das 3—$3^1/_2$fache übersteigt, dennoch mit voller Belastung probiert werden können.

Hierzu sind 2 Dynamomaschinen erforderlich. Die zu prüfende Maschine wird von der Transmission aus mit ihrer normalen Geschwindigkeit angetrieben. In den Stromkreis derselben schalte man die zweite Dynamo in Serie mit einem variablen Widerstande. Die letztere Maschine übernimmt nun die Funktion eines Motors und hat mittelst Riemenantrieb die ihr zugeführte elektrische Arbeit, abzüglich der Verluste, wieder an die Transmission abzugeben. Die Wicklungsarten der beiden Maschinen sind ohne Belang, dagegen muss natürlich auf die Tourenzahl und die Spannung entsprechende Rücksicht genommen werden, ferner müssen die Regulierwiderstände eine sehr feine Einteilung besitzen.

Am besten ist es allerdings, wenn beide Dynamos vollkommen gleich gross sind, denn nur unter dieser Bedingung ist es möglich, die oben genannte Leistung zu erzielen.

Die Variationen in der Leistung der Versuchsmaschine werden dadurch erhalten, dass man entweder das magnetische Feld des Motors schwächt (durch Vorschalten eines Regulierwiderstandes vor die Magnetspulen bei Nebenschlussmaschinen), oder durch Veränderung der wirksamen Zahl Armaturwindungen resp. Verstellung der Bürsten (bei Seriemaschinen).

Bei richtiger Wahl der Übersetzungsverhältnisse kann auf diese Weise der gewünschte Effekt vollkommen erreicht werden.

Beispiele über die Berechnung der Magnetwicklung.

Beispiel I. Es sei eine Shunt-Maschine für eine Leistung von 120 Ampère und 400 Volt bei 650 Touren zu berechnen.

Da bereits die Modelle für eine Dynamo von 24 Ampère und 1740 Volt bei 700 Touren vorhanden sind, so benutzen wir dieselben für den vorliegenden Fall und sehen einfach nach, wie die Armatur und die Magnete für die obige Leistung umzuwickeln sind.

Anmerkung. Die effektive Leistung des verwendeten Modells ist zwar ziemlich geringer als die verlangte; es mag indessen schon hier gesagt sein, dass Maschinen, welche ursprünglich für eine hohe Spannung berechnet waren, für eine niedere Spannung umgewickelt, erfahrungsgemäss um 10—20 % mehr beansprucht werden können. Es rührt dies einesteils von der bei niederer Spannung geringeren Isolation, anderenteils von dem Umstande her, dass eben der Querschnitt des Armaturdrahtes, und mit ihm in nahezu gleicher Weise der Strom, welcher aus derselben herausgenommen werden kann, mit dem Quadrate der linearen Dimension wächst.

Die Versuchs-Resultate der ursprünglichen mit Serie-Wicklung und Gramme-Ring versehenen Maschine seien nachfolgende:

1. Bei separat erregten Magneten; Armatur ohne Stron
(Kurve I.)

Touren	Volt	Ampère-Windungen pro Magnetspule	Touren	Volt	Ampère-Windun pro Magnetspule
700	400	1700	700	1500	8400
700	800	3300	700	1600	10000
700	1100	5100	700	1750	13500
700	1300	6700	700	1900	17000

2. Maschine erregt sich selbst (Kurve II).

Touren	Volt	Ampère	Ampère-Windungen pro Magnetspule	Ampère-Windungen Armatur
700	740	4	3400	2240
700	1230	8	6800	4500
700	1480	12,3	10500	6900
700	1650	17	14500	9500
700	1800	24	20400	13400

Die Versuchsresultate aus beiden Tabellen sind in Fig. 96 graphisch d gestellt.

Daten der Versuchs-Dynamo: $D = 510$; $N = 1100$; Läı einer Windung = 1,20 m, Drahtdicke auf der Armatur = 2 mm, fo lich Widerstand der Armatur von Bürste zu Bürste

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{550 \cdot 1{,}2}{50 \cdot \frac{2^2 \pi}{4}} = 2{,}1 \, \Omega.$$

Widerstand der Magnete = 2,9 Ω heiss.

Windungen pro Magnet = 850.

Bei einer beliebigen Stromstärke, z. B. 24 Ampère, verlieren somit

$$24\,(2{,}1 + 2{,}9) = 120 \text{ Volt.}$$

Tragen wir diesen Volt-Verlust als Ordinate, die Stromstärke, o da in der Figur durch die Abscissen die Ampère-Windungen bezeich sind, die dieser Stromstärke entsprechende Zahl Ampère-Windun (20400) als Abscissen auf, und verbinden wir diesen Punkt mit d Nullpunkt des Koordinatensystems, so erhalten wir die Grade III, de verschiedene Ordinatenwerte wir zu Kurve II addieren.

Es zeigt sich hier ganz deutlich der Einfluss der Ankerreaktion auf das magnetische Feld, denn wäre dieser nicht vorhanden, so müsste Kurve IV mit Kurve I übereinstimmen, was allerdings nicht zutrifft. Für irgend eine Erregung, sagen wir beispielsweise 8000 Ampère-Windungen, fällt somit die Bürstenspannung nur infolge der Rückwirkung der 2600 auf der Armatur vorhandenen Ampère-Windungen um 60 Volt, das heisst 4 %. Wir begehen nun keinen grossen Fehler, wenn wir für die nachfolgenden Rechnungen der Einfachheit halber

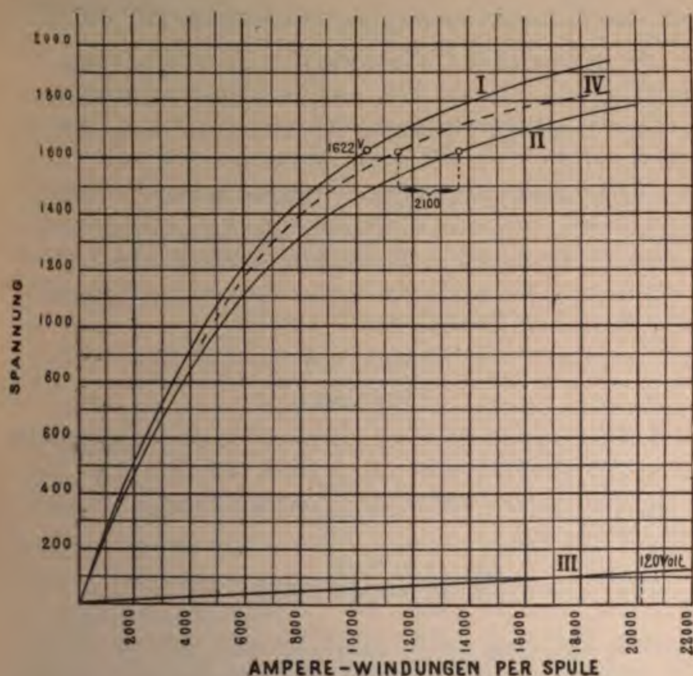


Fig. 96.

annehmen, der erwähnte Spannungsabfall sei direkt proportional der Anzahl Ampère-Windungen auf der Armatur; wären daher statt der 1100 vielleicht 1500 Drähte auf der Armatur vorhanden, so würde der Spannungsabfall bei der gleichen Armatur-Stromstärke

$$4 \cdot \frac{1500}{1100} = 5{,}5\,\%$$

betragen.

a) Berechnung der neuen Armatur.

Beanspruchung des Armaturdrahtes angenommen

$$= 3{,}6 \text{ Amp. pro } 1 \text{ mm}^2.$$

Draht-Querschnitt $= \frac{120}{2} \cdot \frac{1}{3,6} = 16,7 \text{ mm}^2$.

Drahtdicke d $= 4,6$ mm (nach Tab. II) oder isoliert $= 5,1$ mm.

Anzahl Drähte, welche auf der Armatur Platz finden, wenn jeder Draht dicht neben den andern zu liegen kommt,

$$n = \frac{510 \, . \, \pi}{5,1} = 314,$$

wofür wir mit Rücksicht auf allfällige Drivinghorns etc. 300 annehmen.

b) Berechnung der neuen Magnetwicklung.

Der Spannung von 400 Volt entspricht eine bestimmte Linienzahl, welche sich eventuell aus Gleichung (10) berechnen liesse. Dies ist aber nicht notwendig.

Um nämlich die ursprüngliche Charakteristik, Fig. 96, auch für die neue Maschine benutzen zu können, brauchen wir nur nachzusehen, bei welcher Spannung der Versuchsdynamo die gleiche Linienzahl erreicht wurde, und wie gross die hierfür notwendige Erregung war.

Diese Spannung ist offenbar:

$$E = 400 \cdot \frac{1100 \, . \, 700}{300 \, . \, 650} = 1580 \text{ Volt}.$$

Nach Kurve I (Fig. 96) sind hierfür 9700 Ampère-Windungen erforderlich, vorausgesetzt, dass die Armatur stromlos ist. Bei vollem Strom dagegen haben wir in der zu berechnenden Maschine einen Spannungsverlust von

$$e = \frac{150 \, . \, 1,2}{50 \, . \, 16,7} \cdot \frac{100}{2} = 10,8 \text{ V}, = 2,7\,\%$$

der gesamten Spannung. Um daher diesen Verlust in Rechnung zu bringen, suchen wir in Kurve I die entsprechende Erregung für $1580 + 1580 \, . \, 0,027 = 1622$ V. Es sind dies 10400 Ampère-Windungen. Nach Kurve II und IV bedürfen wir nun zur Erzeugung der gleichen Spannung, jedoch mit Rücksicht auf die Armatur-Reaktion $11500 - 10400 = 1100$ *a w* mehr.

Diese Rechnung ist nicht ganz exakt und bedarf noch einer Korrektur, weil die Zahl der Ampère-Windungen beim Versuch verschieden von derjenigen der projektierten Maschine war. Da die Versuchsdynamo 850 Windungen pro Magnet besass, so ergiebt dies bei 11500 *a w* einen Strom, der in diesem Falle auch gleich dem Armaturstrome ist, von

$$\frac{11500}{850} = 13,5 \text{ Ampère},$$

daher *aw* der Armatur gleich

$$\frac{13,5}{2}\cdot\frac{1100}{2} = 3700\,aw,$$

während wir auf der Armatur der neuen Maschine bei vollem Strom (120 A.)

$$\frac{300}{2}\cdot\frac{120}{2} = 9000\,aw$$

haben.

Für die neu zu bewickelnde Maschine wird daher pro Magnet eine Erregung von

$$\text{ca. } 10400 + 1100\cdot\frac{9000}{3700} = \text{ca. } \mathbf{13\,100}\,aw$$

erforderlich sein.

Zu ziemlich dem gleichen Resultate gelangen wir durch folgende Überlegung: Um eine Spannung von 1622 Volt (Klemmenspannung + Ohm'scher Verlust) zu erhalten, sind mit Rücksicht auf die Armaturreaktion nach Kurve IV 11500 aw erforderlich. Bei gleicher Erregung ergäbe dies ohne Armaturreaktion 1682 Volt. Somit beträgt der Spannungsabfall

$$1682 - 1622 = 60 \text{ Volt.}$$

Bei der neuen Maschine ist dieser Verlust grösser und zwar im Verhältnis von $\frac{9000}{3700}$ (= Verhältnis der aw auf der Armatur).

Wir suchen daher auf der Kurve I die aw für

$$1622 + 60\,\frac{9000}{3700} = 1768 \text{ Volt}$$

und finden ca. **13600** aw.

Beispiel 2. Die Daten einer 2poligen Maschine von 3 Kilowatt nach Fig. 17, Taf. II, seien wie folgt:

Klemmen-Spannung = 125 Volt,
Stromstärke = 24 Ampère,
Tourenzahl = 1400.

Ferner ist
$D = 21$ cm, $l = 16$ cm, $N = 424$, Drahtdicke = 2,2 mm (Sektion = 3,8 mm²),
Mittlere Länge eines Armaturdrahtes = 0,52 m,
Voltverlust von Bürste zu Bürste = 7 Volt,
Windungen der Magnetspule = 4700.

Die Versuchsdaten dieser Maschine sind in Fig. 97 enthalten, und zwar bedeutet die Kurve I die Charakteristik bei Leerlauf und II die Armatur und Erreger-Stromstärke bei konstanter Klemmenspannung ($E = 125$ Volt). Wir sehen beispielsweise aus Kurve II, dass bei 24 Amp. 1,78 Amp. notwendig sind, um 125 Volt zu erhalten. Die induzierte E.M.K. beträgt in diesem Falle 148 Volt und der Spannungsabfall ist gleich

$$148 - 125 = 23 \text{ Volt.}$$

Von diesen 23 Volt entfallen 7 auf den Ohm'schen Verlust und 16 auf die Armaturreaktion.

Nehmen wir an, diese Maschine sei für 290 Volt und 8,3 Amp. bei gleichbleibender Tourenzahl umzuwickeln, wobei die ursprüngliche Sättigung so viel als möglich beizubehalten sei. Es ist dann

$$N = \frac{290}{125} \cdot 424 = 980.$$

Für gleichen Ohm'schen Verlust ist der Drahtquerschnitt im Verhältnisse der Stromstärken zu ändern, oder

$$q' = q \cdot \frac{J'}{J} = 3.8 \cdot \frac{8.3}{24} = 1.3 \text{ mm}^2.$$

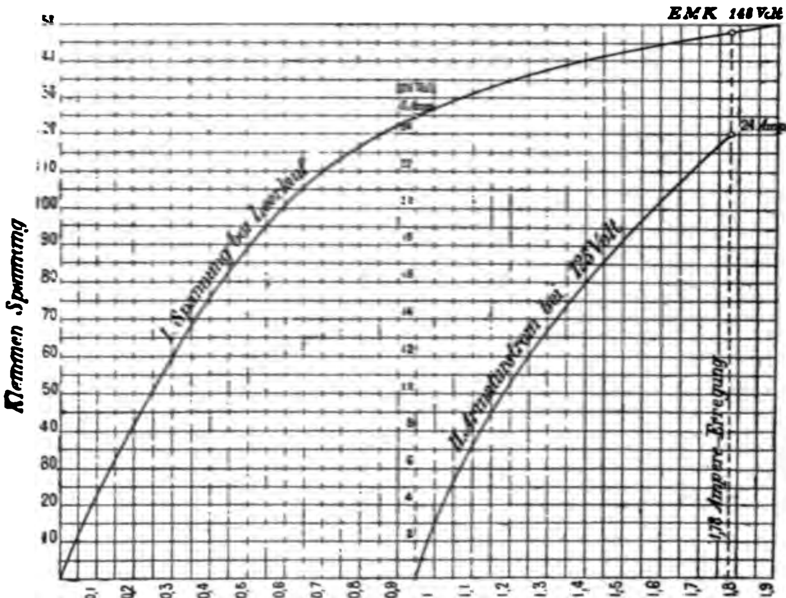


Fig. 97.

Wählen wir die Zahl der Nuten gleich 53, so beträgt die Breite einer Nute + Breite der Zacken

$$= \frac{210}{53} \cdot \pi = 12.5 \text{ mm}.$$

Die Nutenbreite kann also höchstens 6.5 mm betragen, wovon noch 1 mm für die Isolation in Abfall kommt. Es verbleiben somit 5,5 mm, die gerade genügen, um 3 Drähte von 1,3 mm nacktem Durchmesser zu placieren (Sekt. = 1,32 mm²)

$$\text{Anzahl Lagen pro Nute} = \frac{980}{53 \cdot 3} = 6{,}16 \text{ oder rund } 6,$$

somit

$$N' = 53 \cdot 3 \cdot 6 = 954.$$

Um nun die Erregung für die neue Wicklung mit Hilfe der Kurve I zu bestimmen, müssen wir alle Grössen auf die ursprüngliche Wicklung reduzieren. 290 Volt entsprechen $290 \cdot \frac{424}{954} = 129$ Volt der Kurve I. Wir hatten ferner bei 24 Ampère

$$= \left(\frac{424}{2} \cdot \frac{24}{2} = 2540 \text{ Ampère-Windungen der Armatur}\right)$$

einen Spannungsabfall von 16 Volt.

Für die neue Wicklung sind nur noch

$$\frac{954}{2} \cdot \frac{8,3}{2} = 1980 \text{ Ampère-Windungen}$$

vorhanden; der Spannungsabfall beträgt unter diesen Umständen noch

$$16 \cdot \frac{1980}{2540} = 12,5 \text{ Volt.}$$

Ohm'scher Verlust =

$$\frac{0,52 \cdot 954 \cdot 8,3}{50 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,32} = 15,7 \text{ Volt}$$

oder bezogen auf die frühere Wicklung

$$= 15,7 \cdot \frac{125}{290} = 6,8 \text{ Volt.}$$

Die zu erzeugende E.M.K. ist daher 129 + 12,5 + 6,8 = rund 148 Volt, d. h. genau so viel wie vorher. Mithin muss auch die abgeänderte Maschine die gleiche Zahl Ampère-Windungen auf den Magneten erhalten.

Anmerkung. Es ist im allgemeinen wohl kaum möglich, den durch die Armaturreaktion verursachten Spannungsabfall bei einer neu zu konstruierenden Maschine im voraus zu bestimmen. Man muss sich in solchen Fällen durch approximative Abschätzungen behelfen. Zackenarmaturen haben im allgemeinen einen grösseren Spannungsabfall als glatte Armaturen. Wenn man daher den Spannungsabfall bei glatten Armaturen ungefähr gleich dem Ohm'schen Verluste setzt, mag er für Zackenarmaturen etwa zweimal grösser angenommen werden. Diese Regel ist jedoch nur von bedingter Giltigkeit. Picou giebt z. B. in seinem „Traité des machines dynamo-électriques" Angaben über glatte Armaturen, bei welchen die Armaturreaktion den Ohm'schen Verlust bei weitem überschreitet. Es kommt dies daher, dass die betreffende Maschine offenbar eine sehr grosse Bürstenverschiebung besass, was nicht gerade für die Güte der versuchten Maschine spricht. Anderseits weisen die zweipoligen Dynamos der Maschinenfabrik Farcet mit Zackenarmaturen einen relativ geringen Spannungsabfall auf. Beim Type DC18 ist derselbe z. B. nur so gross wie der Ohm'sche Verlust. Vergl. übrigens das auf Seite 39 Gesagte.

F. Die Vorausberechnung der Magnetwicklung.

1. Einleitung. Die Zeit ist noch nicht allzuferne — vielleicht sind es 10 Jahre — wo man noch Dynamomaschinen nach dem Gefühle entwarf und die Taufe erst nach Ergebnis vollzog. Stimmte das Resultat, so war es gut, kam etwas anderes heraus, so war es meist nicht schwer, an Hand der Versuchsresultate die Wicklung derart zu modifizieren, dass das Resultat wenigstens nahezu erreicht wurde. Ganz natürlich war unter solchen Umständen die Fabrikation grösserer Maschinen stets eine riskierte Sache, die einer grösseren Entwicklung elektrischer Kraft- und Lichtanlagen erschwerend im Wege stand. Heute ist dieser Bann gebrochen.

Die Berechnung grösserer Maschinen von über 1000 PS bietet relativ keine grössere Schwierigkeit mehr, als diejenige einer 50 PS und lässt sich mit mindestens ebenso grosser Genauigkeit durchführen, wie für eine Dampfmaschine oder Turbine.

Diese Errungenschaft verdanken wir ausschliesslich der Kenntnis der Magnetisierungsgesetze, an deren Ausbau die jedem Elektrotechniker bekannten Autoritäten Rowland, Lord Elphinstone, Bosanquet, Kapp, Forbes und *last but not least* die Gebrüder Hopkinson thätig waren.

Wir können hier selbstverständlich nicht eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Theorien geben, sondern beschränken uns auf eine kurze Übersicht der wichtigsten Grundzüge derselben.

Rowland war der erste, der in seiner Abhandlung „on the permeability and the maximum of magnetismus of iron, steel and cobalt“ (s. Phil. Mag., Serie IV, vol. X., August 1873) das Ohm'sche Gesetz auch auf magnetische Erscheinungen anwandte, und in der That ist eine gewisse Verwandtschaft in diesen Erscheinungen unverkennbar.

Bezeichnet nämlich

Φ die totale Zahl Kraftlinien, welche in einem geschlossenen magnetischen Stromkreise zirkulieren,

$\mathfrak{R}$ den Widerstand, der sich den magnetischen Kraftlinien entgegensetzt, und

M die magnetisierende Kraft = Stromstärke × Windungen,

so ist nach Rowland

$$\Phi = \frac{M}{\mathfrak{R}} .$$

Es ist dieses Gesetz insofern bedeutend zu nennen, als es eben die Grundlage bildet zu sämtlichen späteren Theorien. Anschliessend an Rowland führte Bosanquet für M die Bezeichnung „Magnetomotorische Kraft“ für $\mathfrak{R}$ „Magnetischen Widerstand“ ein. Er erweiterte das Rowland'sche Gesetz und machte es mehr für den praktischen Gebrauch geeignet. So setzte er für R die Summe der einzelnen in den verschiedenen Punkten eines geschlossenen magnetischen Stromkreises herrschenden magnetischen Widerstände ein (s. Phil. Mag., Juni 1884, p. 532, Electrician, Febr. 1885 u. s. w.).

Im Jahre 1884 brachte Rowland seine berühmte Abhandlung in der Konferenz zu Philadelphia vor, worin er eine Formel zur Berechnung der Kraftlinien in einem Magnete angab.

Es sei wiederum

Φ totale Zahl der Kraftlinien,

m Anzahl magnetisierender Windungen,

$\mathfrak{J}$ Strom in Ampère, der durch m fliesst,

L_e Eisenlänge der Magnete von Pol zu Pol,

S_e Querschnitt der Magnete,
μ mangetische Permeabilität (siehe Seite 2),
$L_l = 2\,\delta$ doppelter Abstand des Armatureisens von den Polen,
S_l' Additions-Faktor, bedingt durch den Streuungsverlust an Kraftlinien beim Übergang aus den Polen in die Armatur.

$$\Phi = \frac{\frac{4\pi}{10}\,\mathfrak{J}m}{\frac{L_e}{\mu S_e} + \frac{L_l}{S_l + S_l'}}.$$

Genauere Angaben finden sich im Electrician vom 14. Febr. 1885.

Von grosser Bedeutung für die Praxis waren auch die Arbeiten von Gisbert Kapp, erschienen im Electrician zwischen Februar 1886 und Mai 1887.

G. Kapp adoptierte zur Vereinfachung der Rechnung für die Kraftlinien eine Einheit (Englische Kraftlinie), die 6000 mal grösser ist als die C.G.S.-Einheit, d. h. 1 englische Kraftlinie = 6000 C.G.S.-Kraftlinien.

Dadurch würde Gleichung (10) zu

$$E = \Phi \,.\, N \,.\, n \,.\, p \,.\, 10^{-6}.$$

In dem Nachstehenden sollen indessen stets C.G.S.-Kraftlinien vorausgesetzt sein.

Bezeichnet $\mathfrak{J}m$ die pro magnetischen Stromkreis notwendige Anzahl Ampère-Windungen, Φ wie früher die totale Zahl der von einem Pole ausgehenden Kraftlinien, so ist nach G. Kapp

$$\Phi = \frac{c \,.\, \mathfrak{J}m}{\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l},$$

wo $\mathfrak{R}_m$ den magnetischen Widerstand bedeutet, der sich den Kraftlinien beim Durchpassieren durch die Magnete entgegenstellt, $\mathfrak{R}_a$ den magnetischen Widerstand der Armatur, und $\mathfrak{R}$ den doppelten Widerstand der Luftschicht zwischen Armatureisen und Polschuhen; c ist eine Konstante.

Es bedeute ferner Φ' die Anzahl Kraftlinien, welche durch Streuung verloren gehen, indem sie, statt ihren Weg durch die Armatur zu nehmen, einfach den kürzesten Weg von einem Pole zum andern einschlagen, und sozusagen einen „magnetischen Kurzschluss“ bilden. Wir müssen somit, um Φ effektive Kraftlinien in der Armatur zu erhalten, in den Magneten

$$\Phi'' = \Phi + \Phi'$$

erzeugen.

$$c\,(\mathfrak{J}m)' = (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l)\,\Phi.$$

$$\Phi = \frac{(\mathfrak{J}m)'}{\mathfrak{R}_l'} \cdot c.$$

$\mathfrak{R}_l'$ = mittlerer Widerstand, der sich den Kraftlinien für das direkte Überschreiten von einem Pole zum andern entgegenstellt.

$$c(\mathfrak{J} m)'' = \mathfrak{R}_m \Phi''.$$

$$\mathfrak{J} m = (\mathfrak{J} m)' + (\mathfrak{J} m)'',$$

oder

$$\mathfrak{J} m = \Phi \left[\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l + \frac{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_l}{\mathfrak{R}'_l} \right] \frac{1}{c}.$$

Um den mit der Sättigung zunehmenden magnetischen Widers des Eisens zu berücksichtigen, stellte G. Kapp die Hypothese auf, Wachsen dieser Widerstände vollziehe sich nach dem Gesetze Tangente eines Bogens, der den Sättigungsgrad bedeute und bei der vollständigen Sättigung entspricht.

$$R_m = a \cdot \frac{L_m}{S_m} \cdot \frac{tg\left(\frac{\pi}{2} \sigma_m\right)}{\frac{\pi}{2} \sigma_m};$$

$$R_a = \beta \cdot \frac{L_a}{S_a} \cdot \frac{tg\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sigma_a\right)}{\frac{\pi}{2} \sigma_a};$$

$$R_l = \gamma \cdot \frac{2\delta}{S_l};$$

$R'_l = \frac{1730}{\sqrt{D l}}$ für aufrechte Hufeisenmaschinen;

$R'_l = \frac{1170}{\sqrt{D l}}$ für umgekehrte Hufeisenmaschinen mit Fundationsp (Type Edison).

Worin $\sigma_m = \frac{B_m}{B_{m\,max}}$; $\sigma_a = \frac{B_a}{B_{a\,max}}$ . .

Nach Kapp ist

$B_{max} = 16600$ für Gusseisen;
24000 „ Schmiedeisen.

L_m = Länge der Kraftlinien in den Magneten in cm,
L_a = „ „ „ „ der Armatur in cm,
L_l = doppelter Luftabstand in cm,
S_m, S_a u. S_l = Querschnitte der Magnete, Armatur und Luft, in cm².

Siehe Figuren

	Für Maschinen mit schmiedeisernen Magneten	gusseisernen Magn
$c =$	2000	2400
$\alpha =$	2	3
$\beta =$	2	2
$\gamma =$	1440	1800

Tabelle der Tangenten-Funktion $\dfrac{tg\left(\frac{\pi}{2}\sigma\right)}{\frac{\pi}{2}\sigma}$.

Linien pro cm²	Tangenten-Funktion Armatur	Tangenten-Funktion Magnet	Linien pro cm²	Tangenten-Funktion Armatur	Tangenten-Funktion Magnet
3000	1,01	1,01	14000	1,43	2,95
4000	1,02	1,05	15000	1,53	4,5
5000	1,03	1,09	16000	1,65	10,9
6000	1,05	1,13	17000	1,83	~
7000	1,08	1,17	18000	2,04	
8000	1,11	1,25	19000	2,38	
9000	1,13	1,33	20000	2,85	
10000	1,17	1,47	21000	3,73	
11000	1,22	1,65	22000	5,27	
12000	1,27	1,89	23000	10,06	
13000	1,35	2,24	24000	~	

Beispiel. Man bestimme die erforderliche Zahl Ampère-Windungen für eine Serienmaschine (Type Edison, siehe Taf. II Fig. 2) mit folgenden Daten:

Magnete aus Schmiedeisen,
$E = 106$ (in der Leitung)
$J = 82$
$n = 360$
$N = 328$
$D = 25$
$l = 25.$
$L_m = 122;$ $S_m = 400;$
$L_a = 33;$ $S_a = 376;$
$L_l = 2,4;$ $S_l = 900.$

In der Armatur und in den Magneten sollen 15 Volt verloren gehen. Es wird daher:

$$\Phi = \frac{(106 + 15)\,60 \,.\, 10^8}{360 \,.\, 328} = 6,1 \,.\, 10^6;$$

$$B_m = \frac{6,1 \,.\, 10^6}{400} = 15200;$$

$$B_a = \frac{6,1 \,.\, 10^6}{376} = 16200;$$

$$B_l = \frac{6,1 \,.\, 10^6}{900} = 6800;$$

$$R_l' = \frac{1170}{\sqrt{25 \,.\, 25}} = 46,8.$$

Die Werte der Tangentenfunktion können mittels Interpolation aus der Tab. Seite 139 bestimmt werden, da jedoch die Magnete ziemlich stark gesättigt sind, ist für diesen Teil eine genaue Berechnung der Funktion vorzuziehen.

$$\sigma_m = \frac{15200}{16600} = 0{,}915;$$

$$\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\sigma_m\right)}{\frac{\pi}{2}\sigma_m} = 5{,}22;$$

$$\frac{tg\left(\frac{\pi}{2}\sigma_a\right)}{\frac{\pi}{2}\sigma_a} = 1{,}69 \text{ (aus Tabelle Seite 139)}$$

$$\mathfrak{Z}\,m = \frac{1}{2400}\left[\left(122 \,.\, 15\,200 \,.\, 2 \,.\, 5{,}22 + 33 \,.\, 16\,200 \,.\, 2 \,.\, 1{,}69 + 1440 \,.\, 2{,}4 \,.\, 6800\right) + \left(33 \,.\, 16\,200 \,.\, 2 \,.\, 1{,}69 + 1440 \,.\, 2{,}4 \,.\, 6800\right)\frac{1}{46{,}8}\right] = 23\,000 \; a\,w.$$

Diese Zahl stimmt ziemlich genau mit den Versuchsresultaten für stromlose Armatur überein (ca. 24 000). Bei vollem Strom dagegen würde man mit 23 000 $a\,w$ nur ca. 95 Volt erhalten.

Dieses Beispiel mag genügen.

Obwohl diese Kapp'schen Formeln längere Zeit sozusagen die einzigen waren, welche dem Dynamo-Konstrukteur für die approximative Vorausbestimmung seiner Maschinen zur Verfügung waren, so dürften sie heute wohl kaum mehr angewandt werden, weil die damit erhaltenen Resultate doch zu wenig Genauigkeit ergeben. Es kommt das daher, dass einmal der Verschiedenheit des Eisenmaterials keine Rechnung getragen ist, ferner sind die Koefficienten c und γ eigentümlicherweise als von der Art des Magnetmaterials abhängig angenommen, was augenscheinlich nicht zutrifft.

2. Die Hopkinson'sche Theorie (Electrician, November und Dezember 1886). Ein Eisenring von gleichmässigem Querschnitte S und einem Umfange L werde mit einer Anzahl m Windungen versehen (Fig. 98). Schickt man nun durch die Spule einen Strom, so werden in dem Ringe magnetische Kraftlinien erzeugt, deren Vorhandensein sich zwar durch keine äusserliche Erscheinung erkennbar macht, aber leicht dadurch konstatiert werden kann, dass man den Ring mit einer zweiten Spule, aus einer oder zwei Windungen bestehend, versieht, welche mit einem Galvanometer in Verbindung steht.

Wird der primäre Strom unterbrochen, so entsteht am Galvanometer ein Ausschlag, der proportional der totalen Zahl Kraftlinien ist.

Wir können diesen Ringmagnet als nonpolaren Magnet bezeichnen, weil er keine ausgesprochenen Pole besitzt.

Die totale Induktion Φ hängt einesteils von der Zahl $a\,w$ und anderseits vom magnetischen Widerstand ab, d. h.

$$\Phi = \frac{4\,\pi}{10} \cdot \mathfrak{J}\,m \cdot \frac{\mu\,S}{L},$$

oder

$$\mathfrak{J}\,m = \frac{10}{4\,\pi} \cdot \frac{\Phi}{S\,\mu} \cdot L.$$

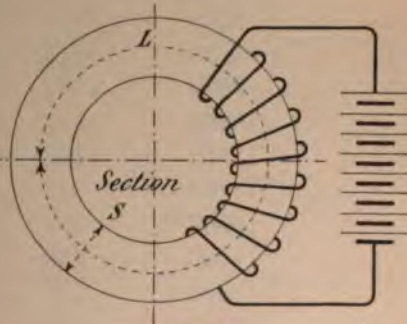


Fig. 98.

μ heisst die spezifische magnetische Leitungsfähigkeit oder Permeabiltät und ist daher

(73)
$$\mu = \frac{\Phi}{S} \cdot \frac{1}{\frac{4\,\pi\,.\,\mathfrak{J}\,m}{10\,L}}$$
$$= \frac{B}{i\,m} \cdot \frac{10}{4\,\pi}.$$

$i\,m = a\,w$ per cm Länge.

Über die Bestimmung von μ siehe Kapitel IV. Führt man die Messung für eine grosse Zahl verschiedener Stromstärken durch, so zeigt sich, dass μ nur im Anfang konstant ist und mit Zunahme der Sättigung rasch abnimmt.[1]) Die nachstehende Tabelle zeigt einige Werte von μ nach Versuchen von Dr. Hopkinson.

Der Ausdruck $\frac{4\,\pi}{10}\,i\,m$ wird in den elektrotechnischen Büchern fast allgemein mit H bezeichnet, folglich ist

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Mit Hülfe der nachstehenden Tabelle, die sich auf gewisse, von Hopkinson untersuchte Eisensorten bezieht, und Gleichung (73) ist es ein Leichtes, die Zahl der $a\,w$ zur Erreichung einer bestimmten magnetischen Intensität auszurechnen, sofern der Querschnitt überall der gleiche bleibt.

---

[1]) Messungen bei sehr kleinen Sättigungsgraden ergeben sogar im Anfange eine Zunahme von μ; für den praktischen Gebrauch kommen indessen solche Werte nicht mehr in Betracht.

Tabelle der Werte von μ.

Ausgeglühtes Schmiedeisen		Graues Gusseisen	
B	μ	B	μ
4650	4650	3870	763
6200	3877	4650	756
7750	3031	6200	258
9300	2159	7750	114
10800	1921	9300	74
12400	1409	10800	40
14000	907		
15500	408		
17000	166		
18600	76		
20100	35		
21700	27		

Es sei beispielsweise die Länge eines schmiedeisernen Ringes = 21 cm. Um 18600 Kraftlinien pro cm² zu erzeugen, sind

$$\frac{18600}{\mu} \cdot \frac{10}{4\pi} = \frac{18600 \cdot 10}{76 \cdot 4\pi} = 196 \; aw$$

pro cm Kraftlinienlänge notwendig oder total 21 . 196 = rund 4100.

Wir gehen zu einem allgemeineren Fall über, wo der Querschnitt des Magnets sich ändert (Fig. 99). Für diese Anordnung ist der gesamte magnetische Widerstand gleich der Summe der einzelnen Widerstände der verschiedenen Teile, folglich ist

$$\mathfrak{J}m = \frac{10}{4\pi}\left(\frac{\Phi}{S_1 \mu_1} \cdot L_1 + \frac{\Phi}{S_2 \mu_2} \cdot L_2 + \frac{\Phi}{S_3 \mu_3} \cdot L_3 \ldots\right).$$

Sind die einzelnen Teile noch aus verschiedenem Material, so ist μ jeweilig der entsprechenden Rubrik der Tabelle zu entnehmen.

Unterbricht man nun an beliebiger Stelle die Kontinuität des Eisens, so sind die Kraftlinien genötigt, ihren Weg durch den Luftzwischenraum zu nehmen; es bilden sich demgemäss zwei ausgesprochene Magnetpole, für deren Bestimmung die am Anfange des Buches gegebenen Stromregeln verwendet werden. Der Magnetstromkreis erhält dadurch einen neuen additionellen Widerstand von der Grösse.

$$\mathfrak{R} = \frac{L_l}{S_l} \cdot \frac{10}{4\pi}.$$

Gleichzeitig macht sich dadurch eine mehr oder weniger starke Kraftlinienstreuung bemerkbar und zwar kann bei Dynamomaschinen eine nützliche und eine schädliche Streuung unterschieden werden. Die nützliche Streuung äussert sich dadurch, dass auch noch Kraftlinien neben den Polen in die Armatur treten und hier eine wenn auch kleine additionelle Spannung erzeugen. Wir können sie dadurch berücksichtigen, dass wir den nach der obigen Formel berechneten Luftwiderstand mit einem Koeffizienten K multiplizieren, dessen Ableitung weiter unten folgt. Dieser Koeffizient variert je nach den Abmessungen der Pole und der Ausbohrung der Magnete zwischen 0,85—0,95.

Fig. 99.

Der Einfluss der schädlichen Streuung ist mehr sekundär, in dem diejenigen Linien, welche sich direkt von einem Pole zum andern durch die Luft kurzschliessen, zwar von der gleichen Zahl $a\,w$ erzeugt werden, welche auch die nützliche Induktion bewirkt, dagegen veranlassen sie in den Teilen des Eisens, durch welche sie hindurchfliessen, eine höhere Sättigung, folglich eine Verringerung der Permeabilität. Hopkinson trägt diesem Umstande dadurch Rechnung, dass er die aus der Gleichung $\frac{\Phi}{S}$ berechnete Sättigung dieser Teile mit Koefficienten ν, ν' multipliziert, die grösser als 1 sind. (Siehe weiter unten.)

Die allgemeine Formel lautet daher, auf Dynamomaschinen angewandt:

$$(74) \qquad \mathfrak{J}\,m = \frac{10}{4\pi}\left[\left(\frac{\Phi}{S_a \mu_a}\right) L_a + \left(\frac{\nu\,\Phi}{S_m\,\mu_m}\right) L_m + \left(\frac{\nu'\,\Phi}{S_m'\,\mu_m'}\right) L_m' + \ldots \frac{K\,\Phi\,.\,L_l}{S_l}\right].$$

Die am Schlusse des Buches stehende Tab. X, welche wir einem Aufsatze von Ingenieur Wiener im Electrical Engineer 1894 entnehmen, enthält die Streuungskoefficienten ν für fast sämtliche der üblichen Dynamotypen. Diese Tabelle ist für den praktischen Gebrauch überaus bequem, doch muss sie mit Vorbehalt angewandt werden.

Sie bezieht sich offenbar auf Maschinen mit glatten Armaturen, bei welchen die Streuung grösser als bei Zackenarmaturen ist, denn im allgemeinen sind die angegebenen Streuungskoefficienten durchschnittlich grösser, als diejenigen, welche bisher in verschiedenen Zeitschriften

veröffentlicht wurden und Versuchen an Maschinen mit Zackenarmaturen entnommen sind.

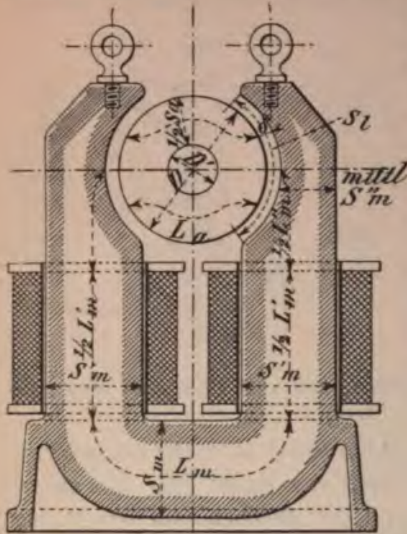


Fig. 100.

Die Gleichung (74) enthält alle Grössen, welche zur Berechnung der $a w$ erforderlich sind. Hopkinson hat daran noch eine äusserst wichtige Umformung vorgenommen, welche das schnelle Rechnen in hohem Masse erleichtert, indem er die Quotienten

$$\left(\frac{v\,\Phi}{S\,\mu}\right) = f(v\,B)$$

in Form von Kurven aufstellte.

$$(75) \qquad \mathfrak{J}m = \frac{10}{4\pi}\Big(f(B_m)\,L_m + f(B_m)'\,L'_m + \dots f(B_a)\,L_a + B_l . 2\delta\Big).$$

In dieser Gleichung ist zu berücksichtigen, dass

$$B_l = K . \frac{\Phi}{S_l} \text{ ist.}$$

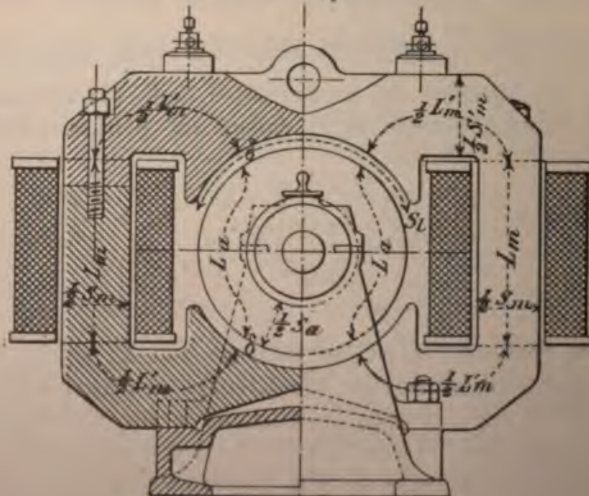


Fig. 101.

Die angehängte lithographierte Tafel I enthält eine Zusammenstellung der Kurven von $f(B)$ für verschiedene Materialien, teils nach

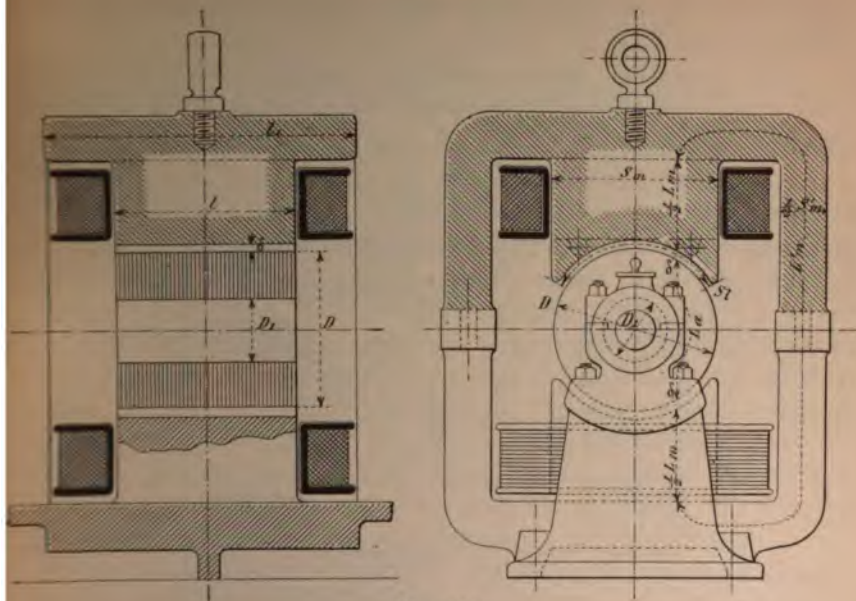


Fig. 102.

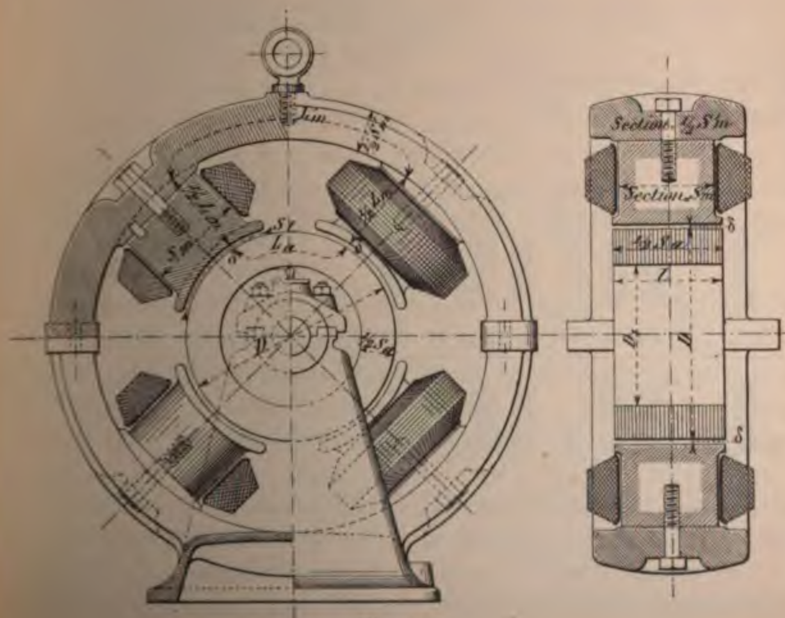


Fig. 103.

Angabe von Hopkinson, teils nach eigenen Versuchen des Verfassers u. s. w.

Um eventuellen Missverständnissen bezüglich der Bezeichnung „magnetische Stromkreise“ vorzubeugen, soll dieser Ausdruck an einigen Typen erklärt werden.

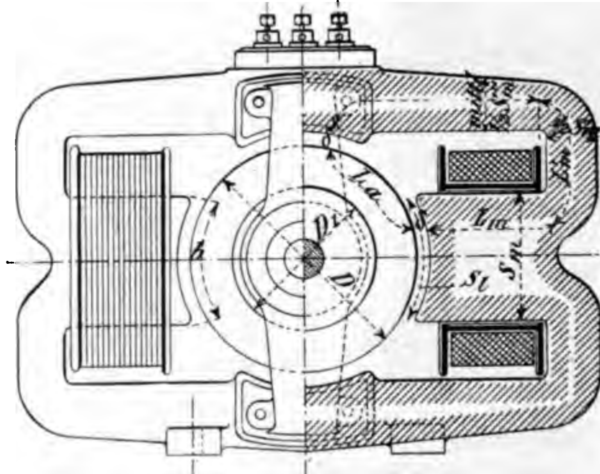


Fig. 104.

Fig.	100	101	102	103	104	105	106
Zahl der Magnetstromkreise . . .	1	2	2	4	4	—	1
Davon entfallen pro Pol	1	2	2	2	2	2	1

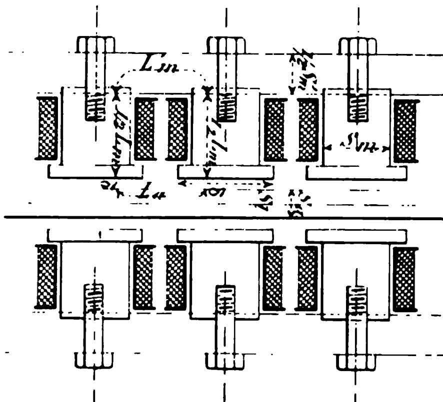


Fig. 105.

Da unter Φ immer die totale Zahl Kraftlinien pro Pol zu verstehen ist, so muss für S der Querschnitt sämtlicher Verzweigungen eingesetzt werden, welche nach dem gleichen Pole hin Kraftlinien schicken.

Anderseits ergiebt die Gleichung (74), bezw. (75), wie übrigens auch die früher erwähnten Formeln von Kapp u. s. w., die Anzahl $a\,w$ pro magnetischen Stromkreis; pro einzelne *Spule entfallen* daher

Fig.	100	101	102	103	104	105	106
Ampère-Windungen	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$	$\frac{1}{2}\mathfrak{J}m$

Gleiche Armatur und Magnetsättigung vorausgesetzt, wird Type 100 etwas mehr Eisen und etwas weniger Kupfer als Type 102 erfordern.

Für die üblichen Proportionierungen dürften Type 101 und 102 ungefähr gleich schwer werden, sowohl was Kupfer als Eisen anbelangt, vorausgesetzt, dass bei Type 102 nicht besondere Polschuhe angewandt werden, in welchem Falle an Kupfer gespart werden kann. Kommt es hingegen darauf an, eine Maschine von möglichst geringem Gewichte ohne Rücksicht auf die Form zu erstellen, so kann Type 101 im Eisen etwas leichter gehalten werden. Type 104 fällt etwas leichter als Type 103 aus; bei Modell 105 ist das Gewicht noch geringer. Das Gewicht steht übrigens auch in engem Zusammenhange mit der Leistung, Spannung etc., für welche ein Modell benutzt wird. Bei grösseren Leistungen verschwinden diese Unterschiede fast vollständig.

In der lithographierten Tafel II sind so ziemlich sämtliche charakteristischen Maschinentypen in systematischer (nicht chronologischer) Reihenfolge und mit Angabe des ersten Konstrukteurs aufgeführt.

Wir können uns eine nähere Beschreibung erlassen, da sich perspektivische Zeichnungen derselben sozusagen in jedem Physikbuche vorfinden. Zu bemerken ist höchstens, dass die Modelle 13, 14, 18 und 22 (Tafel II) auch sehr häufig in Kastenform ausgeführt werden.

Bei einigen dieser Typen ist spezielle Rücksicht auf möglichste Verminderung der Armaturreaktion getragen, auf welche im Kapitel VI näher eingetreten werden soll. Von diesem Gesichtspunkte aus sind beispielsweise die Maschinen Nr. 17, 27 und 30 entworfen worden, ferner die Maschinen von Couffinhal, von welchen sich eine Schnittzeichnung im Kapitel VIII befindet.

Bestimmung von δ und S für Zacken- und Locharmaturen.

Eine genaue Bestimmung des Luftabstandes δ für Zacken- und Locharmaturen hat insofern seine Schwierigkeit, als δ nicht nur von der Gestalt, Anzahl und Grösse der Zacken respektive Löcher abhängt, sondern auch in nicht geringem Masse durch den Sättigungsgrad des Armatureisens beeinflusst ist. Dass es so sein muss, geht aus einer einfachen Überlegung hervor: da nämlich die Luft für das Durchpassieren der Kraftlinien je nach dem Sättigungsgrade einen ca. 200—1000 mal grösseren Widerstand darbietet, als das Armatureisen, so ist es einleuchtend, dass sich auch die Kraftlinien nicht gleichmässig am Umfange der Armatur verteilen, sondern in den Zacken konzen-

trieren, während zwischen den Zacken bedeutend weniger Kraftlinien durchgehen.

Für gewöhnlich macht man bei Zackenarmaturen δ nicht unter

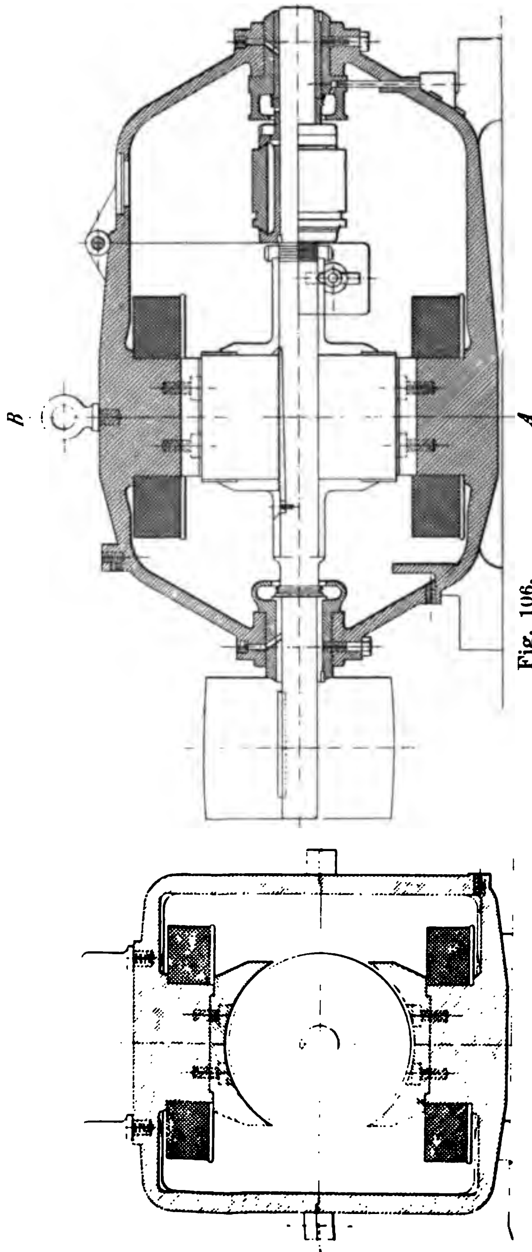


Fig. 106.

0,5—0,6 u (Fig. 107) und $u = 0{,}5 u_1$ (angenähert).

In diesem Falle würde approx.

$$\delta' = 1{,}1\ \delta$$

und

$$S_l = \frac{u_1 + u_2}{2 u_1} \cdot S_l' = 0{,}75\ S_l'.$$

Diese Berechnung ist indessen nicht ganz exakt, da die Kraftlinienrichtung keine vollkommen gerade ist. Der wirkliche mittlere Querschnitt wird dadurch etwas grösser, umsomehr, wenn man noch die Ausstrahlung im Innern der Zacken in Rechnung zieht.

Behält man in Gleichung (74) und (75) δ für den direkten Abstand bei und wird B_l nach der Gleichung

$$B_l = \frac{\Phi}{S_l} = \frac{\Phi}{b \cdot l}$$

berechnet, so muss das so erhaltene B_l noch mit einem Koeffizienten K' multipliziert werden, dessen

angenäherte Grösse der nachstehenden empirischen Tabelle entnommen werden kann.

Werte von K'.

Zacken-öffnung cm	Luftabstand δ in cm					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,4	1,3	1,27	1,24	1,2	—	—
0,6	1,34	1,31	1,27	1,24	1,2	—
0,8	—	1,37	1,34	1,30	1,26	1,23
1,0	—	—	1,36	1,32	1,28	1,24
1,2	—	—	—	1,35	1,30	1,26

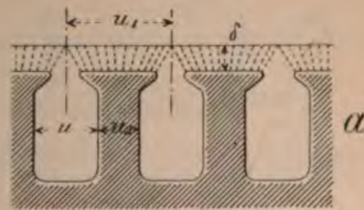


Fig. 108.

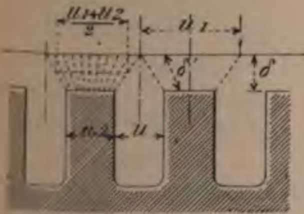


Fig. 107.

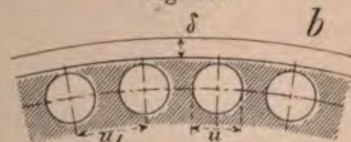


Fig. 109.

Für halbgeschlossene Nuten wird es genügen, B_i' 15—20 $^0/_0$ grösser anzusetzen, während bei Locharmaturen keine Kraftlinienkontraktion stattfindet.

Die letztere Maschinenart scheint übrigens in letzterer Zeit fast gänzlich aufgegeben worden zu sein.

Das Gleiche ist auch, zwar in bedeutend geringerem Masse, von der glatten Armatur der Fall, welche vorteilhaft durch Zackenarmaturen ersetzt wird.

Die Vorzüge der letzeren sind zweifacher Art:

1. grössere mechanische Festigkeit,
2. geringeres Kupfergewicht der Magnetwicklung.

Selbst dann, wenn die Nuten mit schlecht eingerichteten Fräsmaschinen hergestellt werden müssen, also verhältnismässig grosse Arbeitskosten veranlassen, stellen sich die Gesamtkosten nichtsdestoweniger etwas niedriger, als bei glatten Armaturen. Öfters ist auch

die erstere Konstruktion aus mechanischen Gründen geboten. Bei Maschinen mit hohen Spannungen dagegen, die gewöhnlich als Grammering ausgeführt werden, treten die Vorteile der Kupferersparnis zurück gegenüber den mannigfaltigen Vorzügen der glatten Armatur — grössere Isolationsfähigkeit, kleinere Armatureaktion, daher geringere Bürstenverschiebung, einfachere Konstruktion u. s. w.

Gezahnte Armaturen erhitzen sich leicht, wenn sie nicht sehr sorgfältig nach dem Fräsen nachgefeilt und verputzt werden.

Bestimmung des Koeffiz. K der nützlichen Streuung.

Da die für die Luft erforderlichen Ampère-Windungen stets einen grossen Bruchteil der gesamten Ampère-Windungen ausmachen, so spielt auch der Koeffizient K eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Die früheren Auflagen enthielten bereits einige Andeutungen über den ungefähren Wert dieses Koeffizienten. Es handelt sich nun darum, denselben auf mathematischem Wege abzuleiten.

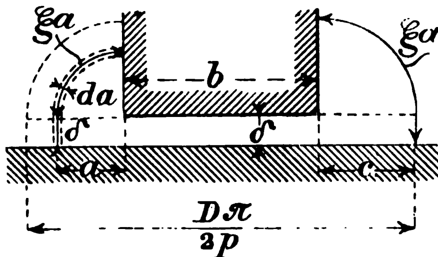


Fig. 110.

Es bedeute

Φ die totale Zahl nützlicher Linien, welche in die Armatur eintreten,

Φ_1 die an den Polflächen austretenden Linien,

Φ_2 die Linien beider Streufelder links und rechts von den Polen,

C_1 u. C_2 die respektiven Leitungsfähigkeiten,

l die Armaturlänge.

Demnach wäre

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Aus der bekannten Analogie zwischen den Gesetzen elektrischer Ströme und den elektromagnetischen Erscheinungen folgt anderseits:

Gesamte Leitungsfähigkeit = Summe der einzelnen Leitungsfähigkeiten oder

$$(76) \qquad C = \frac{1}{R} = \frac{1}{K' \cdot K \cdot \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{\delta}{b\,l}} = C_1 + C_2.$$

Die Grösse C_1 kennen wir bereits von früher her.

Dieselbe ist mit Bezug auf Figur 110

(77) $$C_1 = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{b\,l}{\delta}$$

Für die Streulinien machen wir die Voraussetzung, dass sich dieselben zu beiden Seiten der Pole in kreisförmigen Linien gruppieren mit dem Abstande a von den Polecken als Radius. $\xi a + \delta$ sei die Kraftlinienlänge, wobei ξ je nach der Grösse des Winkels α, den die Polflächen mit der Armatur einnehmen, folgende Werte annehmen kann:

$$\alpha = 90 \qquad \xi = \frac{\pi}{2}$$
$$\alpha = 120 \qquad \xi = \tfrac{2}{3}\pi$$
$$\alpha = 150 \qquad \xi = \tfrac{5}{6}\pi$$
$$\alpha = 180 \qquad \xi = \pi$$

Für irgend ein Leiterelement im Abstande a ergiebt sich die Leitungsfähigkeit

$$d\,C_2 = \frac{4\pi}{10}\,l\,\frac{da}{\xi a + \delta}$$

oder total

(78) $$C_2 = 2 \cdot \frac{4\pi}{10}\,l \int_{a=0}^{a=c} \frac{da}{\xi a + \delta} = 2 \cdot \frac{4\pi}{10}\,\frac{l}{\xi} \log_{nat} \left(\frac{\xi c + \delta}{\delta} \right)$$
$$= 4{,}6 \cdot \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{l}{\xi} \log \left(\frac{\xi c}{\delta} + 1 \right).$$

Wir setzen noch die aus (77) und (78) berechneten Werte von C_1 und C_2 in Gleichung (76) ein und bestimmen hieraus K.

(79) $$K = \frac{1}{1 + \frac{K'}{b} \cdot \frac{\delta}{\xi} \cdot 4{,}6 \cdot \log \left(\frac{\xi c}{\delta} + 1 \right)} = \frac{1}{1 + K' \frac{x}{b}}$$

Die Tab. IX am Schlusse des Buches enthält die ausgerechneten Werte von x und wird bei der Konstruktion gute Dienste leisten.

Beispiel. Die Ausbohrung einer Maschine sei 32 cm; Polbogen $b = 35$ cm, $c = 7{,}5$ cm, $\delta = 1{,}2$ m und $\alpha = 150^\circ$.

Für diese Angaben ergiebt die Tabelle IX

$$x = 2{,}88,$$

folglich

$$K = \frac{1}{1 + \frac{x}{b}} = \frac{1}{1 + \frac{2{,}88}{35}} = 0{,}92.$$

Für diejenigen Dimensionen, welche nicht in den Tabellen enthalten sind, muss die Grösse entweder durch Interpolation oder, mit Hilfe der Gleichung (79) bestimmt werden.

Bestimmung des Streuungsverlustes.

Zum besseren Verständnis der erwähnten Streuungsverluste möge Fig. 111 dienen, wo die punktierten Linien die durch Streunng verloren gehenden Kraftlinien bedeuten.

Es ist augenscheinlich, dass der Querschnit *I* die grösste Zahl Kraftlinien umfasst, weil durch ihn überhaupt die gesamte Zahl derselben gehen muss. Dagegen nimmt dieselbe sowohl gegen die Armatur, als auch gegen die beiden Magnetbügel hin ab, weil sich unterwegs ein grosser Teil der Kraftlinien durch die Luft kurzschliesst.

Bedeutet daher Φ die aus den Polen noch in die Armatur übertretenden, also wirksamen Kraftlinien und x den Verlust vom Querschnitte *I* bis in die Armatur, so müssen wir folglich in *I*

$$\nu\ \Phi = \Phi \,.\, (1 + x)$$

Kraftlinien erzeugen.

Der Koeffizient ν kann entweder durch Rechnung oder durch Versuch bestimmt werden.

Man bringt auf die Querschnitte *I*, *II* und *III* je eine Windung, die man auf die geeignete Weise abwechselnd durch ein ballistisches Galvanometer mit vorgeschaltetem Widerstand kurzschliessen kann. Die beiden Windungen *III* müssen natürlich hintereinander geschaltet werden. Hat man irgend eine der 3 Windungen mit dem Galvanometer verbunden, so erhält man durch plötzliches Unterbrechen des Magnetstromkreises oder durch Einschalten dieser Windungen einen Ausschlag, der proportional der Gesamtzahl der von der sekundären Windung geschnittenen Kraftlinien ist. Es seien *s I*, *s II*, *s III* die jeweiligen Galvanometerausschläge, wobei man zweckmässigerweise jeden Versuch zweimal durchführt, indem man den Strom kommutiert und für *s* den Abstand der beiden Umkehrungspunkte setzt.

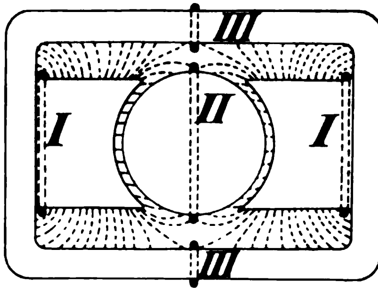


Fig. 111.

Es ist dann

$$\text{für Querschnitt } I\colon\ \nu = \frac{s\,I}{s\,II};$$

$$\text{für Querschnitt } III\colon\ \nu = \frac{s\,III}{s\,II}.$$

Anmerkung. Der letzterhaltene Wert von ν kann unter Umständen kleiner als 1 ausfallen, so dass es möglich ist, jenen Querschnitt entsprechend kleiner zu halten.

Führt man die gleichen Versuche auch für andere Querschnitte durch, so sieht man, dass sich der Koeffizient ν stetig ändert, auch ist sein maximaler Wert je nach der Magnetform verschieden gross.

Nichtsdestoweniger kann man, ohne grosse Fehler zu machen, ν für eine gewisse Länge konstant annehmen. Man zerlegt dann den ganzen magnetischen Stromkreis in einzelne Teile, berechnet für jeden die theoretische Linienzahl B und multipliziert dieselbe mit den respektiven Koeffizienten ν, ν', ν'' u. s. w., die natürlich nach den maximalen Werten schätzungsweise angenommen werden müssen.

Um den Streuungsverlust auf rechnerische Weise zu bestimmen, ist folgender Gang einzuschlagen.

Denken wir uns in a und b (Fig. 112) die Pole des Streuungsfeldes; Φ seien die nützlichen Linien, die zwischen $a\ \varrho\ b$ cirkulieren und $\nu\,\Phi$ die Linien zwischen a und b, die verlorenen Linien sind folglich gleich $(\nu - 1)\,\Phi$.

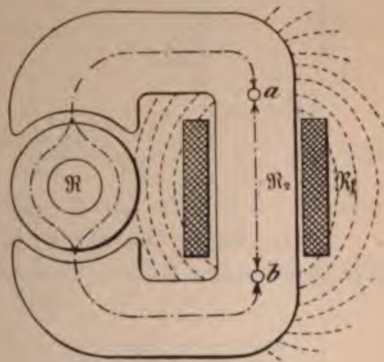


Fig. 112.

Mit $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{R}_1$ und $\mathfrak{R}_2$ sollen ferner die magnetischen Widerstände der einzelnen Stromkreise bezeichnet werden.

Für die Kraftlinien, welche durch die Armatur gehen, ist nach Früherem

$$\mathfrak{J}\,m = \mathfrak{R}\,\Phi + \mathfrak{R}_2\,(\Phi\,\nu).$$

Gleicherweise muss aber auch

$$\mathfrak{J}\,m = \mathfrak{R}_2\,(\Phi\,\nu) + \mathfrak{R}_1\,\Phi\,(\nu - 1)$$

sein, da das Streufeld mit der gleichen Zahl $a\,w$ erzeugt wird.

Durch Gleichsetzung folgt daher:

$$\mathfrak{R}_1\,\Phi\,(\nu - 1) = \mathfrak{R}\,\Phi$$

oder

(80) $$\nu = \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{R}_1} + 1.$$

Man erhält hinreichend genaue Zahlen, wenn man für $\mathfrak{R}$ den blossen Luftwiderstand

$$\frac{2\,\delta}{S_l} \cdot K$$

einsetzt; für $\mathfrak{R}_1$ kann die Methode von Prof. Dr. Forbes (Journal Soc. Telegr. Eng. No. 64 und Electrician, Dez. 1886) benutzt werden.

Steht C_1, C_2, C_3 für die reciproken Werte der Widerstände der einzelnen Streufelder (deren Gesamtwiderstand gleich $\mathfrak{R}_1$ ist), so mag

je nach Umständen zu deren Bestimmung eine der nachstehenden Formeln benutzt werden:

a) Zwischen 2 einander gegenüber liegenden, annähernd gleich grossen parallelen Oberflächen kann die magnetische Leitungsfähigkeit C_1 der Luft gleich der halben Summe der Oberflächen dividiert durch die gegenseitige Distanz angenommen werden. (Die Masse sind in cm verstanden.)

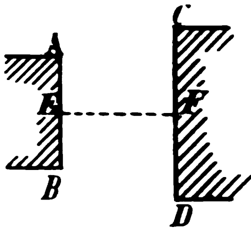


Fig. 113.

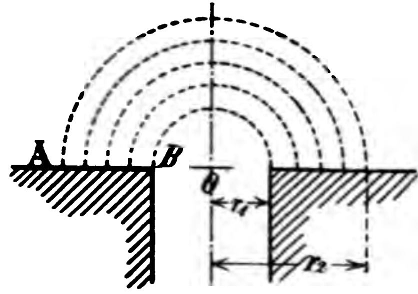


Fig. 114.

(81) $$C_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{AB + CD}{EF} \cdot a.$$

a = Höhe der Körper senkrecht zur Papierebene.

b) Liegen die Oberflächen in einer Ebene (Fig. 114) und übersteigt ihre gegenseitige Distanz eine gewisse Grenze nicht, so gilt

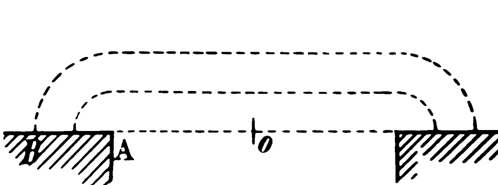


Fig. 115.

(82) $$C_2 = \int_{x=r_1}^{x=r_2} \frac{a\,dx}{\pi \cdot x}$$

$$= 2{,}3 \cdot \frac{a}{\pi} \cdot \log \frac{r_2}{r_1} .$$

$$r_2 = OA,$$

$$r_1 = OB.$$

c) Für jene Fälle wo der Abstand jenen Grenzwert überschreitet (Fig. 115), gilt die Formel:

(83) $$C_3 = \int_{x=0}^{x=AB} \frac{a\,dx}{\pi x + 2\,OA} = 2{,}3 \cdot \frac{a}{\pi} \log \frac{\pi AB + 2\,OA}{2\,OA} .$$

(84) Totale Leistungsfähigkeit $C = C_1 + C_2 + C_3 = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} \cdot$

Die angegebenen 3 Berechnungsmethoden dürften so ziemlich für alle vorkommenden Fälle ausreichen. Bei Streuungen, welche sich durch die Magnetspulen hindurchpflanzen, ist zu beobachten, dass nur ein Teil der Windungen das Streufeld verursacht. Da eine genaue

Berechnung in solchen Fällen ungemein kompliziert wäre, kann diesem Umstande dadurch Rechnung getragen werden, dass man die Leitungsfähigkeit dieses Zweiges nur halb so gross annimmt, als aus der Rechnung folgt.

Beispiel. Wir benutzen als Beispiel einen 2poligen Gleichstrommotor von 1,5 PS, aufrechter Hufeisentype (Fig. 116).

a) Streuung von A nach B und C nach D (Fall c) innerhalb der Spule.

$$C_1 = \frac{1}{2} \cdot 2 \frac{19}{\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{\pi . 8{,}5 + 2 . 4{,}5}{2 . 4{,}5} = \ldots\ldots \quad 8{,}3$$

b) Streuung von A nach B und C nach D (Fall c) oberhalb der Spule.

Approximativ ist

$$C_2 = 2 \cdot \frac{18}{\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{\pi . 7 + 2 . 7}{2 . 7} = \ldots\ldots \quad 10{,}8$$

c) Streuung EF (Fall a) innerhalb der Spule.

$$C_3 = \frac{1}{2} \frac{12 . 19}{9} = \ldots\ldots \quad 12{,}7$$

d) Streuung GH (Fall c).

$$C_4 = \frac{12}{\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{\pi . 5 + 2 . 4{,}5}{2 . 4{,}5} = \ldots\ldots \quad 3{,}8$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = \ldots\ldots \quad 35{,}6$$

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{1}{35{,}6} \cdot \frac{10}{4\pi}.$$

Mit Berücksichtigung des Eisenwiderstandes (8000 Linien im Gusseisen, μ = ca. 100) findet man

$$\mathfrak{R} = \frac{10}{4\pi}\left(\frac{1}{14 . 12} + \frac{2 . 15}{8{,}5 . 12 . 100}\right)$$

$$= \frac{10}{4\pi} . 0{,}009.$$

$$\nu = 1 + \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{R}_1}$$

$$= 1 + 0{,}009 . 35{,}6 = \mathbf{1{,}32}.$$

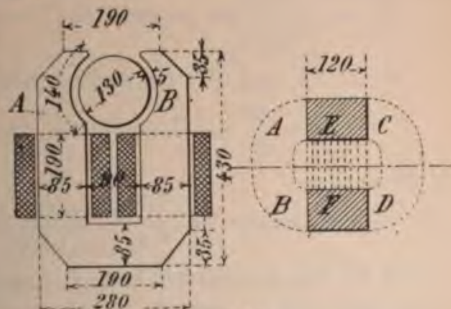


Fig. 116.

Man sieht aus dem einen Beispiele, dass der individuellen Auffassung des Konstrukteurs mehr oder weniger Freiheit gelassen ist, das Resultat hängt dementsprechend auch davon ab.

Anmerkung. Um die Rechnung nicht allzusehr zu komplizieren, ist es eine allgemeine Regel, dass man den maximalen Streuungskoeffizienten nur für die Länge des Kraftlinienkreises anwendet, der von den Magnetspulen bedeckt ist und auf dem übrigen Teil die Streuung vernachlässigt.

Ein Blick auf die angehängte Tabelle X belehrt uns, dass der Streuungskoeffizient für die verschiedenen Typen sehr schwankt und bei einigen Maschinenformen sogar ziemlich hohe Zahlen erreichen kann. Man würde jedoch offenbar zu weit gehen, wenn man diesem

Umstande allzugrosse Bedeutung beilegen wollte, denn erstens ist der magnetische Widerstand derjenigen Teile, welche einer Streuung unterworfen sind, verhältnismässig klein gegenüber dem gesamten magnetischen Widerstand und überdies beträgt der Erregerstrom kaum einige Prozente des totalen Stromes.

Die Rücksichtnahme auf die Streuung tritt daher in den Hintergrund gegenüber den gewichtigeren sonstigen elektrischen und konstruktiven Eigentümlichkeiten, welche die verschiedenen Typen charakterisieren.

Beispiele über Berechnungen von Magnetwicklungen.

a) Umrechnung einer bereits ausgeführten Maschine.

Wir haben bereits weiter oben gezeigt, in welcher Weise die Magnetwicklung an der Hand der Versuchskurven ermittelt werden kann, wenn die Ausbohrung der neuen sowohl als der Versuchsmaschine die gleiche bleibt. Bei glatten Armaturen ist diese Bedingung nicht immer erfüllbar. Je nach der Bewicklung kann eine grössere Ausbohrung notwendig sein, oder es kann umgekehrt infolge der geringeren Drahtdicke eine Reduktion des Luftabstandes möglich sein. Da in einem solchen Falle, abgesehen vom Luftwiderstand, nichts am magnetischen Widerstande geändert wird, bestimmen wir auf bekannte Weise die Differenz der für die Luft benötigten Ampère-Windungen.

Es sei $(\mathfrak{J}\, m)$ die gesamte Zahl $a\,w$ beim Luftabstande δ_1
$(\mathfrak{J}\, m)'$ „ „ „ „ „ „ δ_2
K und K' die Streuungskoeffizienten (s. S. 149 u. 151) und

$$B_l = \frac{\Phi}{S_l} \text{ die Liniendichte in der Luft,}$$

so ist

$$(85) \qquad (\mathfrak{J}\, m)' = (\mathfrak{J}\, m) - \frac{10}{4\,\pi} K \,.\, K' \,.\, B_l\, 2\,\delta_1 + \frac{10}{4\,\pi} K\, K'\, B_l \,.\, 2\,\delta_2$$

K und K' fallen selbstverständlich je nach der Grösse von δ verschieden gross aus, sind δ_1 und δ_2 jedoch nicht sehr weit auseinander, so ist es, ohne wesentliche Fehler zu begehen, erlaubt, die Streuungskoeffizienten als Konstant anzusehen. Die Gleichung (85) nimmt dann folgende einfache Form an

$$(86) \qquad (\mathfrak{J}\, m)' = (\mathfrak{J}\, m) - 1{,}6\, K\, K'\, B_l\, (\delta_1 - \delta_2).$$

Beispiel 1. Bei der auf Seite 134 (siehe Fig. 97) **behandelten Maschine** von 3 KW betrug δ 3 mm. Angenommen, die **neue Maschine von 290 Volt** habe einen Luftabstand von 4 mm und es sei die **Anzahl Ampère-Windungen** hierfür auszurechnen.

Bei 148 Volt ist

$$\Phi = \frac{148 \,.\, 60 \,.\, 10^8}{1400 \,.\, 424} = 1\,500\,000.$$

Es sei

$$S_l = b \, . \, l = 22 \, . \, 16 = 352,$$

so ist

$$B_l = \frac{1\,500\,000}{352} = 4250.$$

Wir bestimmen noch K und K'. Für

$$\alpha = 180^0 \quad \text{und} \quad c = 6$$

wäre bei

$$\delta = 3 \text{ mm} \qquad K = 0{,}964$$
$$\delta = 4 \;\; \text{„} \qquad K = 0{,}956.$$

Der geringe Unterschied der Streuungskoeffizienten erlaubt uns in beiden Fällen K = konstant = 0,96 im Mittel zu setzen. Desgleichen soll K' = konstant = 1,3 im Mittel angenommen werden.

Es ist folglich nach Gleichung (86)

$$(\mathfrak{J}m)' = 8360 - 1{,}6 \, . \, 0{,}96 \, . \, 1{,}3\,(0{,}3 - 0{,}4) = 8785 \text{ Ampère-Windungen.}$$

Fig. 117.

Öfters scheint es wünschenswert, für die neue Maschine mit veränderter Ausbohrung nicht nur einige spezielle Daten, sondern die ganze Charakteristik zu besitzen. Zu diesem Zwecke berechnet man den Faktor $K\,K'$ 1,6 . $B_l(\delta - \delta_1)$ für irgend ein beliebiges, jedoch möglichst hohes B_l, trägt seinen Wert mit den entsprechenden Koordinaten (Fig. 117) auf und verbindet den so erhaltenen Punkt mit den Koordinaten-Nullpunkten. Ist $\delta > \delta_1$, so subtrahiert man die Abscissenwerte der so gebildeten Geraden von den Abscissen der Kurve I; ist $\delta < \delta_1$, so addiert man diese Abscissen zur Kurve I, wodurch die neue Charakteristik erhalten wird.

Beispiel 2. Nicht selten wird dem Konstrukteur folgende Aufgabe gestellt: Ein Motor, der für eine bestimmte Tourenzahl berechnet war, läuft z. B. nach Versuch langsamer als gewünscht, und muss nun auf die verlangte Tourenzahl gebracht werden. Ist die Differenz nicht sehr bedeutend und besitzt der fragliche Motor eine Nebenschlusswicklung, so ist die Lösung von vornherein gegeben. Man verringert die Induktion Φ durch eine entsprechende Ausbohrung. Bei einem Seriemotor sind zwei Wege möglich und man kann entweder einen Teil der Magnetwicklung abwickeln oder die Pole grösser ausbohren, häufig auch werden beide Methoden gleichzeitig angewandt. Das Abwickeln allein hat insofern sein Bedenkliches, als daraus leicht Funkenbildung am Kollektor entstehen kann; grosse Ausbohrungen anderseits haben den Nachteil grösserer Streuung, vermindern im übrigen die Funkenbildung und Bürstenverschiebung. Die Berechnung der neuen Ausbohrung ist höchst einfach: Die Maschine wird versuchsweise als Motor mit der vorgeschriebenen Spannung und Armaturstromstärke laufen gelassen und die Erregung mittelst einem Widerstandsregulator (bei Nebenschlussmotoren in den Magnetstromkreis, bei Seriemotoren parallell zur Magnetwicklung zu schalten) so lange reguliert, bis die richtige Tourenzahl erreicht ist. Man erhält auf diese Weise zwei verschiedene Erregungen in $a\,w$, die erstere ohne Widerstand bei verminderter Tourenzahl, die zweite bei der richtigen Tourenzahl. Die Differenz muss durch Vergrösserung des Luftraumes kompensiert werden.

Es sei B_l die Luftliniendichte für die normale Tourenzahl und $\mathfrak{Z}\,m$ die aus dem Versuch erhaltene Differenz der $a\,w$ beider Ablesungen (pro magnetischen Stromkreis), so ist die Vergrösserung der Ausbohrung

$$\delta = \frac{1}{2} \mathfrak{Z}\,m \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{1}{B_l},$$

d. h. der Durchmesser der Ausbohrung muss 2δ grösser gemacht werden.

Soll gleichzeitig auch die Windungszahl (bei Seriemotoren) verringert werden, so ist für $\mathfrak{Z}\,m$ derjenige Betrag einzusetzen, welcher durch Vergrösserung der Ausbohrung kompensiert werden soll.

b) Berechnung einer neu zu konstruierenden Maschine.

Einige Beispiele mögen dazu dienen, die Anwendung der abgeleiteten Formeln auf bestimmte Fälle zu veranschaulichen. Wir übergehen hier die Vorausbestimmung der Armatur, welche im Kapitel II D erschöpfend behandelt wurde.

In Wirklichkeit erfolgt die Bestimmung der Armatur Hand in Hand mit der Berechnung der Magnete und es können die Armaturdimensionen erst als definitiv betrachtet werden, wenn sich auch für die Magnete acceptable Verhältnisse ergeben haben. Obwohl hier der individuellen Anschauung ein weiter Spielraum gelassen ist, mögen für den Anfänger einige Winke, über die Art und Weise, wie in solchen Fällen vorzugehen ist, von Vorteil sein.

Nachdem man die ungefähren Dimensionen der Armatur mit Hilfe der Gleichungen 49—52 oder, sofern man einige Übung besitzt, durch Abschätzung ermittelt hat, schreitet man zur Bestimmung der Draht-

zahl N unter Voraussetzung einer bestimmten Anzahl Ampère-Windungen pro cm Armaturumfang (k)

$$N = \frac{k \cdot 2 p_1 D \pi}{\mathfrak{J}}.$$

Es ist lehrreich, bei dieser Gelegenheit die Tabelle ausgeführter Maschinen auf Seite 80—81 zu konsultieren.

k variiert je nach der Grösse der Maschinen innerhalb ziemlich weiten Grenzen 60—150 und mehr (s. S. 45).

Statt dessen kann man auch an der Hand der Gleichungen (46) und (47) den ungefähren Drahtquerschnitt berechnen und mit Hilfe einer kleinen Skizze (vergleiche S. 71) nachschauen, wie viel Drähte auf der Armatur Platz finden, wobei darauf zu achten ist, dass k für kleinere Maschinen nicht grösser als ca. 80—100, für grössere Maschinen nicht grösser als ca. 120—150 wird.

Man zeichnet nun roh die Magnete auf, unter Reservierung eines durch Abschätzung erhaltenen reichlichen Wicklungsraumes für die Magnetspulen und berechnet die Ampère-Windungen für die Luft.

Damit die Maschine mit einer gewissen Stabilität läuft (vergleiche S. 83 u. s. w.), müssen die aw für den übrigen magnetischen Stromkreis ungefähr gleich, oder wenn möglich, grösser als diejenigen der Luft sein. Diese Überlegung führt uns andererseits zur Annahme der Querschnitte, welche den Magneten zu geben sind.

Als Kontrolle mag ein Vergleich zwischen den aw der Armatur und denjenigen der Magnete angestellt werden. Die aw der Armatur pro magnetischen Stromkreis berechnen sich nach der Formel

$$aw_a = \frac{\mathfrak{J} N}{4 p \cdot p_1}. \tag{87}$$

Diejenigen der Magnete sind gleich $\mathfrak{J} m$.

Für normale Ausführungen variiert $\mathfrak{J} m$ zwischen 2 bis 4 mal aw_a, eventuell müssen die Armaturabmessungen entsprechend modifiziert werden. Es hängt dies auch vom Wicklungsraume der Magnete ab, welcher unter allen Umständen einer Verifizierung nach den Formeln 61—63 bedarf. Desgleichen sollte zur weiteren Kontrolle die Gleichung (26) benutzt werden.

Ist man schliesslich durch mehrmalige Änderung der Masse und Wicklungen zu annähernd brauchbaren Resultaten gelangt und entsprechen die Verluste in den einzelnen Teilen der Maschine den Voraussetzungen, so kann endlich zur definitiven Berechnung der Wicklung geschritten werden. Aber auch hiermit ist die Aufgabe des Konstrukteurs keineswegs erschöpft. Er ist zwar nun ziemlich sicher, eine Maschine herzustellen, welche alle Bedingungen bezüglich Leistung

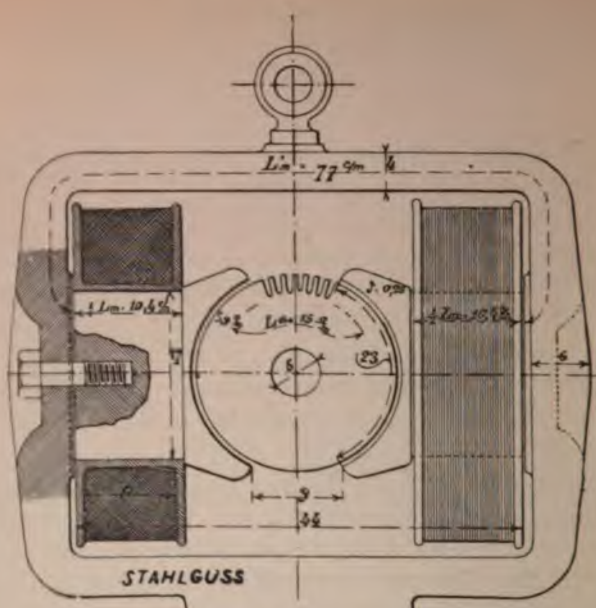


Fig. 118.

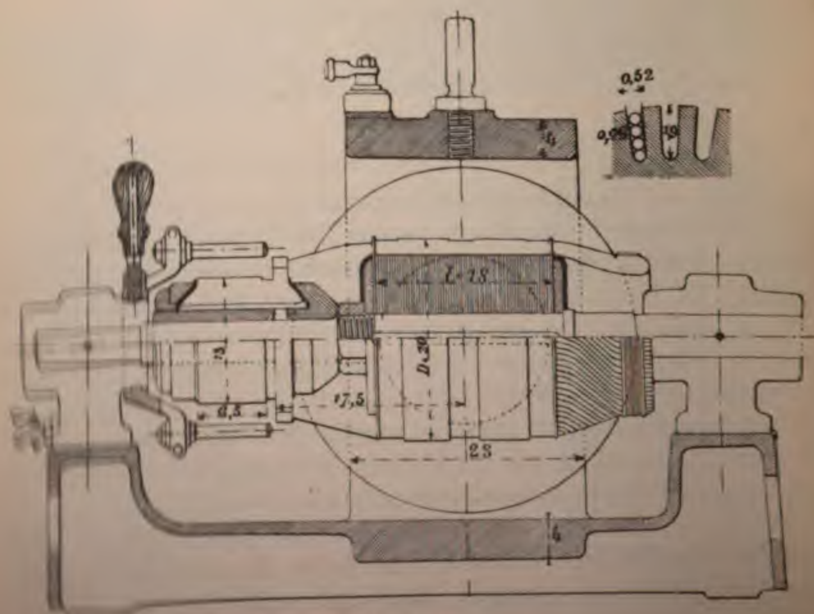


Fig. 119.

und Nutzeffekt erfüllt, womit jedoch nicht gesagt ist, dass sie auch hinsichtlich funkenlosen Ganges einwurfsfrei sei.

Da wir uns momentan jedoch nur mit der Magnetwicklung beschäftigen, mögen diese Angaben vorläufig genügen; die Kontrolle der Maschine, mit Rücksicht auf die Funkenbildung, bildet den Gegenstand eines besonderen Kapitels (VI).

Beispiel I. Es sei eine zweipolige Nebenschlussmaschine von 4,5 KW bei 1200 Touren zu konstruieren nach dem Type 118 u. 119.

Die näheren Angaben dieser Maschine sind folgende:

$E = 125$ Volt,
$J = 36$ Amp.,
$D = 20$ cm, $l = 18$ cm, Zackenarmatur,
Nutenzahl = 60 à 4 Drähten, $N = 240$,
Drahtdicke nackt 3,2 mm, isol. 3,9 mm, Querschnitt = 8 mm².
Mittlere Länge einer Armaturwindung = 0,55 m.

Hieraus folgt

$$\text{Ohm'scher Spannungsverlust} = 0{,}55 \cdot \frac{240}{2} \cdot \frac{36}{2} \cdot \frac{1}{50 \,.\, 8} = 3 \text{ Volt.}$$

Der Spannungsabfall, erzeugt durch die Armaturreaktion, mag 7 Volt betragen, also gesamter Spannungsabfall = 10 Volt; um sicher zu gehen und für die Regulierung noch eine gewisse Freiheit zu besitzen, setzen wir hierfür 15 Volt ein.

$$\Phi = \frac{(125 + 15)\, 60 \,.\, 10^8}{240 \,.\, 1200} = 2\,900\,000.$$

Berechnung der Magnete.

Nach Tab. X ist $\nu = 1{,}28$ für den Magnetkern. Der Einfluss der Streuung erstreckt sich natürlich auch auf eine gewisse Länge des Bügels (äusserer Stromkreis). Wir berücksichtigen dies dadurch, dass wir den Querschnitt des Bügels gegen die Magnetspulen hin etwas vergrössern und dafür für diesen Teil ν überall = 1 annehmen.

Für die Pole benutzen wir die Tab. IX.

$$\alpha = 180^0, \; c = 4{,}5 \text{ cm}, \; \delta = 0{,}25$$

folglich

$x = 0{,}55$ (durch Interpolation bestimmt)
$K = 0{,}98$
$K' = 1{,}3$ (Seite 149).

Bei dieser, wie allen ähnlichen Berechnungen, wird man sich mit Vorteil einer gewissen schematischen Reihenfolge bedienen (siehe Kap. XI), wodurch die nachträgliche Übersicht wesentlich erleichtert wird.

Bestimmung der Ampère-Windungen.

	Spezifikation	Eisenquerschnitt in cm²	Streuungskoeffizient	Linienzahl pro cm²	$f(B)$	Kraftlinienlänge (L) in cm	$f(B).L$
Stahlguss	Magnetpole	$S_m = 225$	$\nu = 1{,}28$	16500	65	20,8	1350
Stahlguss	Magnetbügel	$S_m' = 184$	$\nu = 1$	15800	48	77	3700
	Luftraum	$S_l = 415$	$K.K' = 0{,}98.1{,}3$	8900	—	0,5	4450
	Armaturkern	$S_a = 185$	—	15700	35	18,8	660
	Zacken	$S_a' = 185$	—	15700			
							10160

Ampère-Windungen pro magnet. Stromkreis $= \frac{10}{4\pi} \cdot 10160 =$ **8140.**

Mittlere Länge einer Magnetwindung = 0,77 m.

Querschnitt des Magnetdrahtes $= \frac{0{,}77 \cdot 8140}{50 \cdot 125} = 1\,\text{mm}^2$.

Drahtdurchmesser nackt = 1,2 mm, isol. 1,7 mm.

Windungen pro Spule = 43 Lagen à 53 Windungen = 2228.

Erregerstrom $= \frac{8140}{2} : 2228 = 1{,}83$ Ampère.

Kontrolle.

Damit die Pole durch die Armaturreaktion nicht entmagnetisiert werden, muss

$$\frac{4\pi}{10} \frac{JN}{2p \cdot 2p_1} \cdot \beta \cdot \frac{1}{2\delta K'} < B$$

sein, oder

$$N < 6{,}37 \cdot \frac{B p p_1 \delta K'}{J \cdot \beta} = < 6{,}37 \cdot \frac{8900 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}25 \cdot 1{,}3}{36 \cdot 0{,}72} = < 710.$$

Wir besitzen also eine $\frac{710}{240} = 3$fache Sicherheit.

Es sind ferner die

$$aw \text{ der Armatur} = \frac{240 \cdot 36}{4 \cdot 1 \cdot 1} = 2160$$

woraus sich folgendes Verhältnis ergiebt:

$$\frac{aw \text{ Magnete}}{aw \text{ Armatur}} = \frac{8140}{2160} = \mathbf{3{,}76.}$$

Berechnung der Verluste.

1. Eisenverlust: Da die Zacken gleich wie der Kern gesättigt sind, greifen wir die beiden Verluste zusammen.

   Totaler Eiseninhalt = 4060 cm³.

   Sättigung . . . = 15700

$\eta\, B^{1,6}$ für $\eta = 0{,}003 = 15510$ (nach Tab. VI durch Interpolation bestimmt)

$$\text{Periodenzahl } \omega = \frac{1200 \,.\, 1}{60} = 20$$

folglich Eisenverlust $= 4060 \,.\, 15510 \,.\, 20 \,.\, 10^{-7} =$ **126** Watt.

Anmerkung. Wenn wir so rechnen, erhalten wir in Wirklichkeit einen etwas zu grossen Wattverlust, da die Armaturreaktion direkt der Magnetwicklung bezw. der Linienzahl entgegenwirkt und eine Verminderung derselben herbeiführt. Wir haben also im Grunde genommen in der Armatur nur noch eine Linienzahl, entsprechend der Klemmenspannung + dem Ohm'schen Verluste.

2. Verlust durch Wirbelströme (Eisenblechdicke = 0,05 cm). Nach Gleichung (36) ist dieser Wattverlust für das Eisen

$$= \frac{16\,(a\,\omega\,B)^2\,V}{10^{12}} = \frac{16\,(0{,}05 \,.\, 20 \,.\, 15700)^2\, 4060}{10^{12}} = \mathbf{16} \text{ Watt},$$

Verlust im Kupfer und massiven Eisen schätzungsweise angenommen = **48** Watt.

3. Ohm'scher Verlust in den Armaturdrähten
$= 3 \,.\, 36 =$ **108** Watt

4. Verlust durch Erregung $= 1{,}83 \,.\, 125 =$ **230** Watt.

5. Verlust durch Reibung (Reibungskoeff. = 0,06).
Der Lagerdruck mit Berücksichtigung des Riemenzuges verteilt sich auf die beiden Lager ungefähr wie folgt:

	Z	d	Reibungsarbeit
Grosses Lager	132	45 mm	22,4 kgm
Kleines „	46	35 „	6,1 „
			28,5 kgm = **280** Watt.

Zusammenstellung:

1. Eisenverlust Hysteresis	126	Watt
2. „ Wirbelströme	16	„
Wirbelströme im Kupfer	48	„
3. Ohm'scher Verlust in der Armatur	108	„
4. Erregung	230	„
5. Reibung	280	„
Totaler Verlust:	808	Watt
Nutzarbeit =	4500	„
	5308	Watt.

$$\text{Nutzeffekt} = \frac{4500}{5308} = 84\,{}^1\!/_2\,{}^0\!/_0.$$

Bei Anwendung von Kugellagern würde sich der Reibungsverlust vielleicht auf den 5. Teil reduzieren, d. h. auf $\frac{280}{5}$ oder rund 56 Watt.

Der totale Verlust wäre dann noch = 584.

$$\text{und der Nutzeffekt} = \frac{4500}{4500 + 584} = 88{,}5\,\%.$$

Erwärmung.

Magnete. Oberfläche einer Spule

$$= (34{,}5\,\pi\,.\,9) + (34{,}5^2 - 17^2)\frac{\pi}{4}\cdot 2 = 2375\,\text{cm}^2$$

$$\text{Wattverlust pro Spule} = \frac{230}{2} = 115$$

$$\text{Erwärmung nach Gleichung (44)} = 335\cdot\frac{115}{2375} = \text{rund } 17^0\,\text{C.}$$

Armatur. Um genauer zu rechnen, müssen wir hier die Erwärmung des Eisenkörpers und der Drahtverbindungen separat bestimmen. Die Länge eines Drahtes beträgt 0,55 m, wovon 0,18 m auf den Eisenkörper entfallen.

$$\text{Der entsprechende Verlust ist} = \frac{0{,}18}{0{,}55}\cdot 108 = 35\ \text{Watt.}$$

Übrige Verluste = 190 „

Total 225 Watt.

Oberfläche = 20 . π . 18 = 1130 cm². Wir vernachlässigen hier die Seitenflächen, welche nur wenig Wärme ausstrahlen.

$$\text{Erwärmung nach Gleichung (43)} = 225\,\frac{225}{1130} = 45^0\text{C.}$$

Beispiel 2. Das nachstehende Beispiel ist deshalb von Interesse, weil es sich auf eine Maschine der Maschinenfabrik Oerlikon bezieht, welche auf der Pariser Weltausstellung mit dem „Grand Prix" ausgezeichnet wurde. Die Daten dieser mit Seriewicklung versehenen Maschine waren wie folgt:

Klemmenspannung = 600 Volt,
Stromstärke = 330 Amp.,
Tourenzahl = 500.

D = 96 cm, l = 50, glatte Armatur,
N = 400, bestehend aus Kabel von 19 **Drähten à 1,8 mm,** Sekt. = 25 mm², 4 Bürsten.

Fig. 120.

Fig. 121.

Mittlere Länge einer Windung auf der Armatur = 1,58 m,
„ „ „ „ der Magnete = 2,24 m.

$$\text{Voltverlust in der Armatur} = \frac{330}{4} \cdot \frac{400}{4} \cdot \frac{1{,}58}{50.25} = 10{,}4 \text{ V.}$$

Spannungsabfall durch die Armaturreaktion = 16,6 „ (geschätzt)
Voltverlust in den Magneten = 13 „ (angenomm.)
Total = 40 Volt.

$$\Phi = \frac{(600 + 40) . 60 . 10^8}{400 . 500} = 19\,200\,000 \text{ pro Pol.}$$

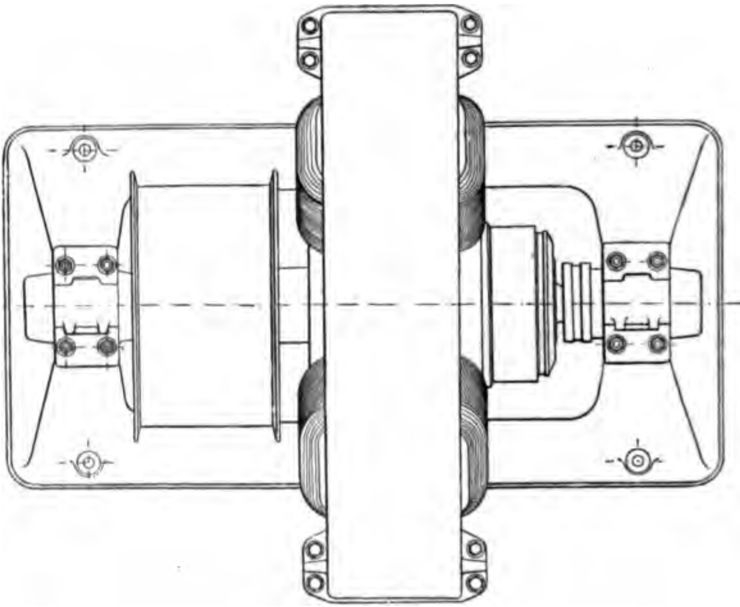


Fig. 122.

Berechnung der Ampère-Windungen.

Spezifikation	Eisenquerschnitt cm²	Streuungskoeffizient	Linienzahl pro cm²	$f(B)$	Kraftlinienlänge (L) cm	$f(B).L$
Gusseisen { Pole	$S'_m = 2200$	$\nu = 1{,}15$ (angenommen)	10000	164	76	12 500
Gusseisen { Bügel	$S''_m = 2300$	$\nu = 1$	8350	89	163	14 500
Luft	$S_l = 2300$	$K = 0{,}9$	7500	—	3,2	24 000
Armatur	$S_a = 1300$	—	14800	24	52	1 250
						52 250

Amp.-Windungen pro magnetischen Stromkreis $= \frac{10}{4\pi} \cdot 52\,250 = 41\,800$

Strom pro Spule $= \frac{330}{4} = 82{,}5$ Amp.[1])

Windungen pro Spule $= \frac{41\,800}{2} \cdot \frac{1}{82{,}5} = 254.$

Drahtquerschnitt bei 13 Volt Verlust

$$s = \frac{254 . 82{,}5 . 2{,}24}{50 . 13} = 72{,}2 \text{ mm}^2.$$

Drahtdurchmesser nackt = 9,6 mm,
isol. = 10,6 mm.

Kontrolle.

Für $\beta = 0{,}6$

$$N < \frac{6{,}37 . 7500 . 2 . 2 . 1{,}6}{330 . 0{,}6} = \mathbf{1550} \text{ statt 400 vorhanden}$$

aw der Armatur $= \frac{330 . 400}{4 . 2 . 2} = 8250.$

aw der Magnete $= 41\,800$

$\frac{aw \text{ der Magnete}}{aw \text{ der Armatur}} = \frac{41\,800}{8250} =$ rund 5

Verluste.

1. Eisenverlust durch Hysteresis
Eiseninhalt $= 166\,000$ cm³
Linienzahl $B = 14800$, $\eta . B^{1,6} = 14100$ für $\eta = 0{,}003$
Perioden $\omega = \frac{500 . 2}{60} = 16{,}7$
Verlust $= 14100 . 16{,}7 . 166000 . 10^{-7}$ = **3920** Watt.
2. Wirbelströme (Eisenblechdicke = 0,06 cm)
Verlust im Eisenkern =
$= 16 . \frac{(0{,}06 . 16{,}7 . 14\,800)^2\, 166\,000}{10^{12}}$ = **585** Watt.
Verlust im Kupfer geschätzt = **1170** Watt.
3. Ohm'scher Verlust in den Armaturdrähten
$= 10{,}4 . 330$ = **3440** Watt.
4. Erregung $= 13 . 330$ = **4290** Watt.
5. Reibung

	Z	d	Verlust
Grosses Lager	2560	110 mm	4330 Watt.
Kleines „	1530	100 „	2360 „
		Total	6690 Watt.

[1]) Alle vier Spulen sind *parallel* geschaltet.

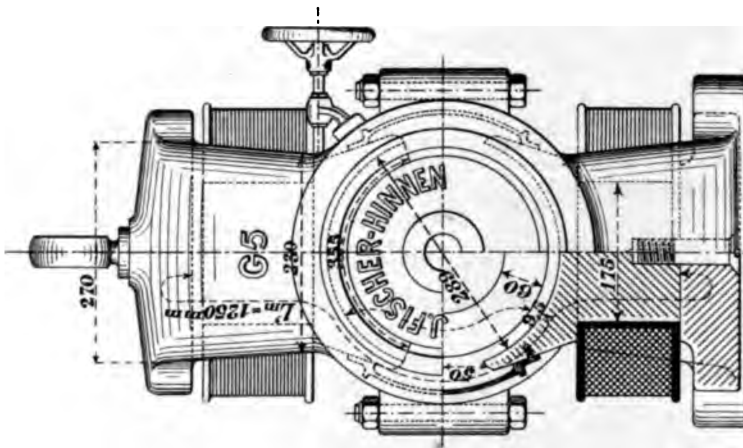


Fig. 124.

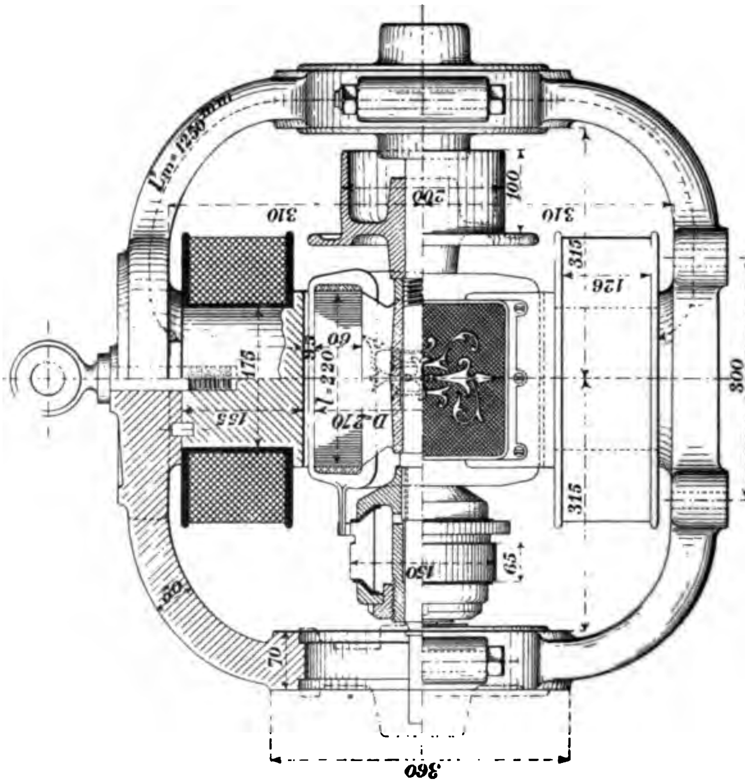


Fig. 123.

Zusammenstellung:

1. Hysteresisverlust	3920	Watt
2. Verlust durch Wirbelströme im Eisen .	585	„
„ „ „ „ Kupfer .	1170	„
3. Ohm'scher Verlust in der Armatur .	3440	„
4. Erregung	4290	„
5. Reibung	6690	„
Totaler Verlust	20095	Watt
Nutzarbeit = 330 . 600 =	198000	„
	218095	Watt.

$$\text{Nutzeffekt} = \frac{198000}{218095} = 91\,\%.$$



Fig. 125.

Beispiel 3. Der in Fig. 123—125 dargestellte Serie-Motor werde an ein Leitungsnetz von konstanter Spannung (115 Volt) angeschlossen. Es ist zu untersuchen, wie sich der Nutzeffekt und die Leistung für verschiedene Belastungen gestalten wird.

Die Daten dieser Maschine sind folgende:

Normale Leistung = 8,5 *PS* bei 1100 Touren.

Armatur: $N = 180$, Drahtdicke = 4,1 mm nackt und 4,8 mm isoliert (Sekt. = 13,1 mm²)
Mittlere Länge einer Windung = 0,59 m
Widerstand von Bürste zu Bürste =

$$\frac{1}{2p_1} \cdot \frac{N}{2p_1} \cdot \frac{1}{50 \,.\, s} = \frac{1}{2} \cdot \frac{180}{2} \cdot \frac{1}{50 \,.\, 13{,}1} = 0{,}04\ \Omega.$$

Magnete: Anzahl Windungen auf beiden Spulen zusammen = 196,
Mittlere Länge einer Windung = 0,82 m,
Drahtdicke = 8 mm nackt, 8,7 mm isol. (Sektion = 50,2 mm²)
Widerstand der Magnete in Serie =

$$\frac{196 \,.\, 0{,}82}{50 \,.\, 50{,}2} = 0{,}064\ \Omega.$$

Nehmen wir den Spannungsverlust inkl. **Spannungsabfall durch** Armaturreaktion bei normaler Leistung (ca. **60 Amp.) zu 10,5 Volt an,** so ergiebt dies eine Induktion

$$\Phi = \frac{(115 - 10,5)\,60 \,.\, 10^8}{180 \,.\, 1100} = \text{rund } 3\,200\,000 \text{ Linien.}$$

Um die Tourenzahl zu bestimmen, legen wir **unserer Berechnung** folgende Induktion zu Grunde

$$\Phi_1 = 3\,200\,000$$
$$\Phi_2 = 2\,800\,000$$
$$\Phi_3 = 2\,200\,000$$
$$\Phi_4 = 1\,300\,000$$

wofür wir auf bekannte Weise die *aw* bestimmen.

Selbstverständlich müssen bei dieser Rechnung die Streuungskoeffizienten entsprechend dem Sättigungsgrade der **Maschine verschieden** gross angenommen werden und zwar darf dies ohne zu **grosse** Ängstlichkeit durch blosse Schätzung geschehen.

Wir gelangen auf diese Weise zu **nachstehender** Zusammenstellung:

1. Berechnung der Ampère-Windungen.

Spezifikation	Eisenquerschnitt cm²	Streuungskoeffizient ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	B_1	B_2	B_3	B_4
Stahlguss Pol	$S_m = 240$	1,3	1,25	1,15	1	17300	14600	10500	5400
Stahlguss Bügel	$S'_m = 207$	1,04	1,03	1	1	16000	13900	10600	6300
Luft	$S_l = 780$	0,95	0,95	0,95	0,95	3900	3400	2680	1580
Armatur	$S_a = 230$	1	1	1	1	13900	12200	9550	5650

Spezifikation	$f(B_1)$	$f(B_2)$	$f(B_3)$	$f(B_4)$	Kraftlinienlänge (L) in cm	$f(B)L$			
Pol	75	23	11	6	$L_m = 2 \,.\, 15,5$	2320	713	340	186
Bügel	36	20	11	7	$L'_m = 125$	4500	2500	1310	880
Luft	—	—	—	—	$L_l = 1,9$	7400	6460	5090	3000
Armatur	17	10	5	2	$L_a = 23$	390	230	115	46
						14610	9903	6855	4112
Ampère-Windungen $aw = \frac{10}{4\pi} f(B)\,L =$						11600	7850	5450	3260
Stromstärke $J = \frac{aw}{\text{Windungen}} =$						60	40	28	17

2. Berechnung der E.M.K.

Klemmenspannung	E_1 =	115,	115,	115,	115	Volt
Ohm'scher Verlust in Armatur und Magneten	=	6,25,	4,25,	2,9,	1,75	
Spannungsabfall durch Armaturreaktion (geschätzt)	=	4,25,	3,25,	2,1,	1,45	
	e =	10,5	7,4,	5,	3,2	
E.M.K.: $E = E_1 - e$	=	104,5,	107,6,	110,	111,8	
Tourenzahl n	=	1100,	1280,	1670,	2860	
Periodenzahl ω	=	18,3,	21,4,	27,8,	47,7.	

3. Berechnung der Verluste.

a) Ohm'scher Verlust in Armatur und Magneten:

bei	60	40	28	17	Amp.
$J^2 . 0,104$ =	374	166	81	30.	

b) Verlust im Eisen:

Eiseninhalt $V = 7560$ cm³, $\eta = 0,002$.

Eisenverl. bei 18,3 Perioden $= 18,3 . 7560 . 8490 . 10^{-7} = 117$ Watt,
„ „ 21,4 „ $= 21,4 . 7560 . 6900 . 10^{-7} = 112$ „
„ „ 27,8 „ $= 27,8 . 7560 . 4825 . 10^{-7} = 101$ „
„ „ 47,7 „ $= \underbrace{47,7}_{\omega} . \underbrace{7560}_{V} . \underbrace{2020}_{\eta . B^{1,6}} . 10^{-7} = 73$ „

c) Verlust durch Foucaultströme:

Dieser Verlust bleibt nahezu konstant bei verschiedener Tourenzahl. Würde man denselben nach der Formel (36) berechnen, so würden wir auf ungefähr 30 Watt kommen; um einigermassen sicher zu gehen und auch den Verlust durch Wirbelströme im Kupfer zu berücksichtigen, nehmen wir denselben doppelt so gross an.

d) Reibung:

Die Bestimmung des Reibungsverlustes wird dergestalt vorgenommen, dass man denselben vorderhand schätzungsweise annimmt und aus der Summe der Verluste den Nutzeffekt und hieraus die Nutzarbeit ausrechnet. Die Zugkraft und die Reibungsarbeit ist auf diese Weise schon mit ziemlich grosser Genauigkeit bestimmt und es hat in der Regel keinen Zweck, die Rechnung noch einmal mit korrigiertem Nutzeffekt durchzuführen, da, wie leicht einzusehen, kleine Fehler in der ursprünglichen Annahme des Reibungsverlustes fast gar keinen Einfluss auf das Endresultat ausüben.

Es mag hier gleich bemerkt werden, dass die Reibungsarbeit bei dieser Maschine verhältnismässig klein ist, zufolge der günstigen Lage der Riemenscheibe.

Reibungsverlust bei	1100	1280	1670	2860	Touren
	220	210	220	340	Watt.

e) Luftreibung:

Der Luftwiderstand mag ungefähr mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wachsen. Wir berücksichtigen dies durch die untenstehenden schätzungsweise ermittelten Zahlen.

f) Bürstenreibung:

Nehmen wir 0,15 cm² pro Ampère und 0,15 kg Bürstendruck. pro cm², so ergiebt dies einen totalen Druck von

$$2 \cdot 60 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}15 = 2{,}7 \text{ kg}.$$

Der Reibungskoeffiziert sei konstant = 0,2 angesetzt. Es ist dann

bei	1100	1280	1670	2860	Touren oder
	8,65	10	13,1	22	m Kommutatorgeschwindigkeit
Reibungsverl. =	46	53	70	117	Watt.

Zusammenstellung der Verluste.

bei	60	40	28	17	Ampère
oder	1100	1280	1670	2860	Touren.
a) Ohm'scher Verlust in Armatur u. Magneten =	374	166	81	30	
b) Hysteresis =	117	122	101	73	
c) Foucaultströme =	60	60	60	60	
d) Reibung (Lager) =	220	210	220	340	
e) Luftwiderstand =	3	19	38	100	
f) Bürstenreibung =	46	53	70	117	
Totaler Verlust =	820	620	570	720	Watt
Elektr. Arbeit =	6900	4600	3220	2012	„
Nützl. „ =	6080	3980	2650	1292	„
Nutzeffekt ζ =	88	86,5	82,5	64,5 %.	

IV. Experimentelle Bestimmung der Permeabilität.

Der ursprüngliche Hopkinson'sche Apparat zur Prüfung der Permeabilität findet sich in jedem Lehrbuche der Elektrziität aufgezeichnet. Da er sich weniger für den praktischen Gebrauch eignet, soll hier eine ebenfalls sehr bekannte einfachere Einrichtung desselben besprochen werden.

Das zu prüfende Eisenstück (Gusseisen oder Schmiedeeisen u. s. w.) hat die in Fig. 126 ersichtliche Form. Um richtige Messungen machen zu können, muss der Querschnitt der beiden magnetischen Stromkreise überall der gleiche sein, ferner darf die Distanz zwischen zwei Schenkeln wegen der Streuung nicht zu klein gewählt werden. Auf dem mittleren Schenkel sind 2 Spulen angebracht, eine grosse I mit möglichst viel Windungen, und eine kleine II, bestehend aus 2—3 Windungen. Die Zahl der Windungen der Spule I richtet sich übrigens nach der Länge L der Kraftlinien und der Stromstärke.

Ist L beispielsweise = 50 cm und es seien noch Messungen bis 19000 Linien bei Stahlguss auszuführen, so wären hierfür ganz approximativ ca. 240 $a\,w$ pro cm Länge oder

$$\text{total } 240 \,.\, 50 = 12000 \; a\,w$$

erforderlich; beträgt der Strom 80 Ampère, so erhält Spule I folglich $\frac{12000}{80} = 150$ Windungen.

Der Widerstand R dient zur Änderung der Erregerstromstärke, die an dem Ampèremeter A abgelesen werden kann. G ist ein ballistisches Galvanometer, das auf die untenstehende Weise mittels eines Kondensators auf bestimmte Elektrizitätsmengen kalibriert wird.

Die Messung der Kraftlinien für eine gegebene Elektricitätsmenge wird auf die Weise vorgenommen, dass man den Erregerstrom durch die Wippe W rasch kommutiert; der Widerstand R_1 wird hierbei zur Regulierung des Galvanometerausschlages benutzt.

Bezeichnet Φ die gesamte Zahl Kraftlinien, welche durch den Querschnitt a gehen, so findet durch die Stromumkehrung in der Spule *II* eine Kraftlinienänderung $= + \Phi - (- \Phi) = 2\,\Phi$ statt.

Die entsprechende Elektricitätsmenge ist daher

$$Q = \frac{2\,m \,.\, \Phi}{R_1}.$$

m = Anzahl Windungen der kleinen Spule;
R_1 = totaler Widerstand des Galvanometerstromkreises, d. h. Zusatzwiderstand + Widerstand der Spule *II* + Widerstand des Galvanometers in CGS-Einheiten.

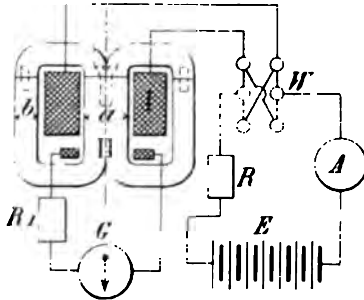


Fig. 126.

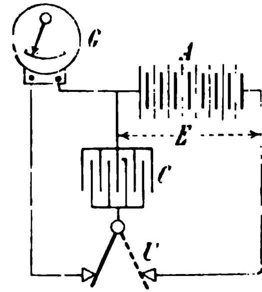


Fig. 127.

Da die Ablenkungen proportional den Elektrizitätsmengen sind, so folgt aus der Ablenkung d und derjenigen von d_1 bei der bekannten Elektricitätsmenge Q_1 des Kondensators

$$Q = Q_1 \cdot \frac{d}{d_1},$$

oder

$$\Phi = Q_1 \cdot \frac{d}{d_1} \cdot \frac{R_1}{2\,m}. \tag{88}$$

Kalibrierung des Galvanometers Fig. 127. **Mittelst des Sabine'schen Schlüssels** U **wird der Kondensator zunächst von der Batterie** A **aus geladen und dann auf das Galvanometer** G **entladen.**

E = Spannung der Batterie in Volt (es genügt übrigens hierfür ein einzelnes Element, dessen Spannung genau bekannt ist),
C = Kapazität des Kondensators in Mikrofarad.

$$Q_1 = E \,.\, C \,.\, 10^{-7} \text{ C.G.S.-Einheiten.} \tag{89}$$

Bezüglich der Ablenkung d und d_1 ist noch zu bemerken, dass für genaue Messungen nicht der erste Ausschlag in die Rechnung ein-

gesetzt werden darf; es müssen vielmehr zwei aufeinander folgende Ablenkungen d_1' und d_1'' beobachtet werden, woraus

(90) $$d_1 = 1{,}25\, d_1' - 0{,}25\, d_1''$$

berechnet wird.

Permeabilitätsprüfungsapparat des Verfassers. Die bekannten Apparate zur Prüfung des Eisens besitzen fast ohne Ausnahme den grossen Nachteil, dass sie gegen äussere magnetische Einflüsse sehr empfindlich sind und deshalb in einem von Eisen freien Raume untergebracht werden müssen. Wenn diese Bedingung schon im allgemeinen ziemlich schwer zu erreichen ist, so dürfte dies in einer Maschinenfabrik, wo sozusagen der letzte Winkel mit Eisen angefüllt ist, rein unmöglich sein. Der Hauptnachteil der meisten dieser Laboratoriumsapparate besteht aber insbesondere darin, dass die zur Prüfung verwendeten Probestücke von relativ grosser Länge sein müssen. Für genaue Messungen ist es nun unerlässlich, dass diese Probestücke aus dem massiven Eisenstück, das zur Verwendung kommen soll, herausgeschnitten werden, weil man nur unter dieser Bedingung sicher ist, dass die magnetischen Eigenschaften genau die gleichen sind. Separat gegossene Stäbe haben z. B. eine ganz andere Struktur, als massive Gussklötze, ferner sind sie härter, weil sie sich schneller abkühlen; notwendigerweise ändert sich dadurch auch die magnetische Leitungsfähigkeit.

Der Verfasser hat daher einen Apparat konstruiert[1]), zu welchem Stäbe von nur 80 mm Länge und 5 cm² Querschnitt erforderlich sind und der bei einer für praktische Zwecke vollständig genügenden Genauigkeit den Vorteil äusserst einfacher und schneller Handhabung besitzt. (Zur Messung einer vollständigen Sättigungskurve sind kaum 5 Minuten erforderlich.)

Derselbe beruht auf dem Prinzipe der magnetischen Wage.

Nach Maxwell beträgt die Zugkraft, welche ein Magnet vom Querschnitte S und der Liniendichte B ausüben kann

(91) $$Z = \frac{B^2 \,.\, S}{981 \,.\, 8\pi \,.\, 1000}\,\text{kg} = \text{rund}\ \frac{B^2 \,.\, S}{25\,000\,000}$$

(92) $$B = \sqrt{\frac{Z \,.\, 8\pi \,.\, 981\,000}{S}} = 5000\,\sqrt{\frac{Z}{S}}\,.$$

[1]) Solche Apparate sind in der Maschinenfabrik Oerlikon, J. Farcot in Paris, Easton, Anderson & Cie., im Arsenale des Österreichischen Lloyd in Triest, in der Stahlgiesserei Gebr. Fischer & Cie., Schaffhausen u. s. w. im Gebrauch.

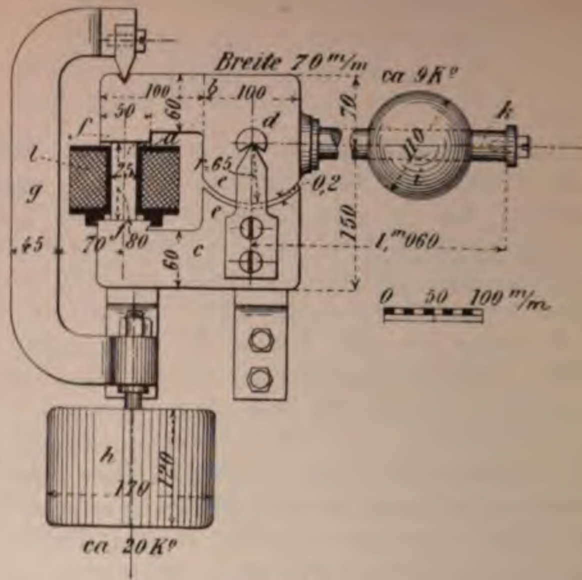


Fig. 128.

Wenn also Z bekannt ist, so kann mit Hilfe von Gleichung (92) B ausgerechnet werden.

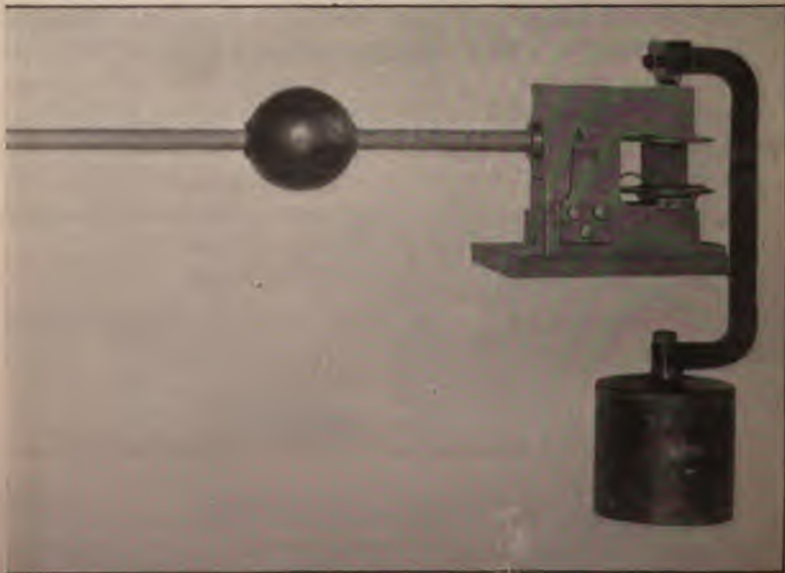


Fig. 129.

Tabelle von *B* und *Z* für einen Probestab von 25 mm Durchmesser.

B	*Z* in kg	*B*	*Z* in kg	*B*	*Z* in kg	*B*	*Z* in kg
500	0,05	5500	6,05	10 500	22,0	15 500	48,0
1000	0,20	6000	7,20	11 000	24,2	16 000	51,2
1500	0,45	6500	8,45	11 500	26,4	16 500	54,5
2000	0,80	7000	9,80	12 000	28,8	17 000	57,8
2500	1,25	7500	11,22	12 500	31,3	17 500	61,3
3000	1,80	8000	12,80	13 000	33,8	18 000	64,9
3500	2,45	8500	14,50	13 500	36,4	18 500	68,5
4000	3,20	9000	16,20	14 000	39,2	19 000	72,3
4500	4,05	9500	18,00	14 500	42,0	19 500	76,0
5000	5,00	10000	20,00	15 000	45,0	20 000	80,0

Die Konstruktion des Apparates ist aus der Zeichnung 128 ersichtlich, Fig. 129 giebt die äussere Ansicht und die Art und Weise der Aufstellung.

a ist das zu prüfende Eisenstück, über welches die Magnetspule gesteckt wird; die Bügel *b* und *c* von bedeutend grösserem Querschnitt bilden mit *a* zusammen den vollständigen magnetischen Stromkreis. Das obere Stück *b* ist auf 2 Schneiden *d* ruhend und drehbar, so dass die runden Polflächen *e e* für irgend welche Lage vollständig gleichen, möglichst geringen Abstand haben. Die Fläche *f*, wie auch die Endflächen der Echantillons, müssen selbstverständlich genau eingeschliffen werden. Um das zu erleichtern, ist die Spule auf einem Schlitten angebracht, welcher erlaubt, dieselbe seitlich zu verschieben. Der Bügel *g* dient zur Erhaltung des Gleichgewichtes, wie auch zur Kalibrierung des Hebels *k*.

Kalibrierung des Apparates. Man sucht vorerst den Nullpunkt, indem man das Gewicht *i* soweit nach dem Aufhängepunkt hinschiebt, bis vollständiges Gleichgewicht hergestellt ist. Die betreffende Stelle wird durch einen senkrechten Strich markiert.

Durch successives Anhängen der in den obigen Tabellen für die verschiedenen *B* angegebenen Gewichte *Z* an den Bügel *g* und Verschieben des Gewichtes *i* werden jeweilig die Gleichgewichtslagen aufgesucht und durch senkrechte Striche bezeichnet.

Ein letzter Skalastrich bedeutet die Kraftliniendichte bei abgenommenem Bügel. Es muss in diesem Falle bei der Berechnung von *B* zu *Z* noch das Gewicht des Bügels addiert werden. Wir vermeiden auf diese Weise eine allzu grosse Belastung der Schneiden, sowie eine zu lange Stange.

Selbstredend hat man den Apparat bei dieser Messung **absolut horizontal aufzustellen**, weil nur unter dieser Bedingung genaue Resultate erreichbar sind.

Hat man öfters derartige Messungen zu machen, so ist es anzuraten, das Ampèremeter des Erregerstromes mit einer Skala zu versehen, welche statt Ampère direkt die *a w* pro cm Kraftlinienlänge ($=\frac{1}{8}$ *a w* total) anzeigt.

Soll nun ein Stab untersucht werden, so wird in der Weise vorgegangen, dass man das Gewicht *i* auf eine bestimmte Linienzahl einstellt (der Bügel *g* bleibt dabei angehängt) und mittelst eines kleinen Rheostaten **die Erregerstromstärke bis zum Abreissen vermindert**; man kann aber auch den Strom konstant halten und das Gleichgewicht durch sanfte, drehende Bewegung so lange verschieben, bis der Anker abgerissen wird.

Korrektion der Versuchsresultate. Während bei höheren Sättigungsgraden der Widerstand des Bügels und der Übergangswiderstand an den Passflächen *e e* vernachlässigt werden kann, bedürfen die Ablesungen von niedrigen Sättigungsgraden, insbesondere bei Messungen von Schmiedeisen und Stahl, einer kleinen Korrektion.

Für die angegebenen Dimensionen sind nämlich zur Überwindung des magnetischen Widerstandes im Bügel und in der Luft, sowie der Übergangswiderstände an den Endflächen des Probestabes ca.:

$$\frac{1,8}{1000} \cdot B + \frac{0,9}{1000} B\, a w$$

nötig, oder per cm Stablänge berechnet

$$\frac{0,22\, B}{1000} + \frac{0,116\, B}{1000}.$$

Das erste Glied berücksichtigt den Widerstand im Eisen, das letztere denjenigen der Luft (0,2 mm).

Die Messungen sind, wie bereits bemerkt, für praktische Zwecke vollständig genau genug. Selbst dann, wenn man den Korrektionswiderstand **doppelt** zu gross oder zu klein annimmt, beträgt der grösste mögliche Fehler bei Schmiedeisen bis zu 10000 Linien kaum 20 %, bei grösseren Sättigungen verschwindet er dagegen vollständig.

V. Lösung einiger praktischer Fragen[1])

über

Gleichstrommaschinen auf graphischem Wege.

Das graphische Verfahren hat bisher auf die Berechnung elektrischer Gleichstrommaschinen so wenig Anwendung gefunden, dass es füglich überraschen muss, und zwar umsomehr, wenn man bedenkt, dass es bis zur Stunde überhaupt noch keine Methode giebt, welche mit vollständiger Umgehung graphischer Hilfsmittel die Verhältnisse einer Maschine auf rechnerischem Wege zu bestimmen gestattet.

Der Grund hierfür mag teilweise in dem Umstande zu suchen sein, dass die Vorzüge des graphischen Verfahrens noch viel zu wenig bekannt sind. Meines Wissens hat Picou zum ersten Male in seinem Buche „Machines Dynamo-électriques" diese Methode in praktisch verwendbarer Form dargestellt.

Es sollen deshalb in Nachstehendem einige der wichtigsten Aufgaben über Dynamomaschinen behandelt werden, um zu zeigen, wie ungemein einfach sich dieselben auf graphischem Wege lösen lassen.

A. Konstruktion der Charakteristik.

Für die Lösung der gewöhnlich in der Praxis vorkommenden Fragen genügt es im allgemeinen, zwei oder drei Punkte der Charakteristik zu kennen, die man auf die übliche Weise mit Zuhilfenahme der Hopkinson'schen Kurven bestimmt. Öfters aber ist es wichtg, eine grössere Zahl von Punkten zu besitzen, in welchem Falle die Berechnung derselben viel zu umständlich wird. Handelt es sich hierbei

[1]) Das nachstehende Kapitel ist ein teilweiser Abdruck eines vom Verfasser in der Elektrotechnischen Zeitschrift, Berlin, Juli 1894, veröffentlichten Artikels.

nicht um allzugrosse Genauigkeit, so wird man sich daher mit Vorteil der nachstehenden graphischen Methode bedienen, die äusserst rasch zum Ziele führt.

Die Hopkinson'sche Formel lautet bekanntlich in ihrer kürzesten Form

$$aw = L_m \cdot f(B_m) + L_a \cdot f(B_a) + L_l \cdot f(B_l),$$

wo B_m, B_a und B_l die Kraftliniendichten in den Magneten, der Armatur und der Luft, L_m, L_a und L_l die respektiven Kraftlinienlängen und aw die gesamte Zahl Ampère-Windungen pro magnetischen Stromkreis bedeuten.

Die Werte von $f(B_m)$ und $f(B_a)$ müssen den Sättigungskurven entnommen werden, für $f(B_l)$ gilt die Formel

$$f(B_l) = 0{,}8 \cdot K' \cdot B_l.$$

Es ist dies die Gleichung einer Geraden.

Die Gesamtzahl Ampère-Windungen setzt sich also aus den Abscissen zweier Kurven und einer Geraden zusammen, wodurch allerdings die Sache etwas kompliziert aussieht. Glücklicherweise dürfen aber im allgemeinen die Werte der Kurve $f(B_a)$ gegenüber der erheblich grösseren der beiden anderen vernachlässigt werden, oder es darf zum mindesten angenommen werden, $f(B_a)$ sei innerhalb der praktisch in Frage kommenden Grenzen proportional B_a. Der Gang der graphischen Bestimmung ist dann folgender: Man benutzt, je nachdem es sich um die Bestimmung einer Maschine mit schmiedeisernen oder gusseisernen Magnetschenkeln handelt, die Hopkinson'schen Sättigungskurven für Schmiedeisen, bezw. Gusseisen, welche für ähnliche Zwecke in grösserer Anzahl hergestellt werden mögen. In denselben bedeuten die Ordinaten die Anzahl Kraftlinien pro cm^2; die Abscissen die entsprechende Zahl Ampère-Windungen pro cm Kraftlinienlänge. Multipliziert man also die Abscissen noch mit L_m, so erhält man die gesamte Zahl der zur Überwindung des Widerstandes in den Magneten nötigen Ampère-Windungen. Am einfachsten geschieht dies dadurch, dass man die Abscissenaxe neu einteilt, wobei jedem Teilstrich ein L_m-mal grösserer Wert der früheren Einteilung entspricht.

Die Ampère-Windungen zur Überwindung des Luftwiderstandes, sowie des Widerstandes im Armatureisen können, wie bereits bemerkt, als angenähert proportional den Kraftlinien betrachtet werden.

Da den Sättigungskurven die Kraftliniendichte in den Magnetschenkeln zu Grunde liegt, so berechnet man zunächst für irgend ein beliebiges, möglichst hohes B_m das entsprechende B_a und B_l

$$B_a = B_m \cdot \frac{S_m}{S_a}.$$

$$B_l = B_m \cdot \frac{S_m}{S_l} \cdot$$

S_m = Querschnitt des Magneteisens in cm²
S_a = „ „ Armatureisens „ „
S_l = „ der Luft „ „

Die hierfür erforderlichen Ampère-Windungen sind ziemlich genau

$$a\,w = L_a \cdot 0{,}0005 \cdot \frac{B_m \cdot S_m}{S_a} + L_l \cdot 0{,}8\ \frac{B_m \cdot S_m}{S_l} \cdot K'$$

oder

$$a\,w = B_m \cdot S_m \left(0{,}0005 \cdot \frac{L_a}{S_a} + 0{,}8 \cdot \frac{L_l}{S_l} K'\right) \cdot$$



Fig. 130.

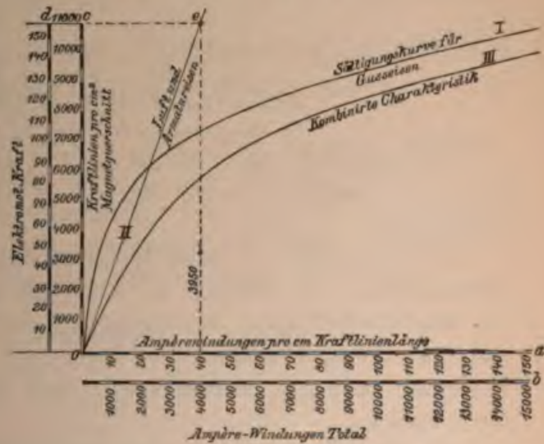


Fig. 131.

Die gefundene Zahl wird mit der Ordinate B_m und der Abscisse $a\,w$ (Fig. 130) aufgetragen[1]) und der Punkt mit dem Koordinatenanfangspunkt O verbunden. Addiert man noch schnell mit Hilfe des Zirkels sämtliche Abscissenwerte der Geraden $O\,A$ zu denjenigen der bereits vorhandenen Sättigungskurve $O\,B$, so stellt die dadurch erhaltene Kurve $O\,C$ die gewünschte Charakteristik dar.

Zu bemerken ist, dass bisher die Kraftlinienstreuung in den Magneten nicht berücksichtigt wurde. Um dieselbe ebenfalls in Rechnung zu ziehen, muss schon für die Sättigungskurve eine neue Ordinateneinheit angenommen werden, die v (Streuungskoeffizient) mal grösser ist, als die ursprüngliche. Es fällt dadurch für eine bestimmte Zahl Ampère-Windungen der damit erreichbare Sättigungsgrad kleiner aus. Selbst-

[1]) In Fig. 130 soll es heissen B_m statt Z_m.

verständlich haben sich dann die für die Luft und Armatur bestimmten Ampère-Windungen auf diese neuen Ordinaten zu beziehen.

Will man die charakteristische Kurve zwischen Ampére-Windungen und E.M.K. haben, so müsste zum Schlusse noch einmal eine Transformation der Ordinaten vorgenommen werden. Man kann sich also diese zweimalige Arbeit ersparen, indem man die aus der letzten Gleichung erhaltene Zahl mit ν multipliziert und später die Ordinateneinheit der zusammengesetzten Kurve ν mal grösser annimmt, d. h. alle Ordinaten durch ν dividiert.

Beispiel. Man habe die Charakteristik einer 2poligen Dynamo von 100 Amp. und 120 V. bei 1470 Touren aufzuzeichnen, mit gusseisernen Magnetschenkeln von durchwegs gleichem Querschnitt.

Die Dimensionen der Maschine seien wie folgt:

$L_m = 100;$ $S_m = 390.$
$L_a = 37;$ $S_a = 220.$
$L_l = 0{,}6;$ $S_l = 631.$

Anzahl Drähte auf der Armatur = 180,
Streuungskoeffizient $\nu = 1{,}2$; $K = 0{,}9$.

Wir benutzen hierzu die in Fig. 131 dargestellte Magnetisierungskurve für Gusseisen, indem wir alle Abscissenwerte mit $L_m = 100$ multiplizieren.

Wir gelangen auf diese Weise zu der mit b bezeichneten neuen Abscissenskala, bei welcher die Abscissen die total zur Überwindung des Magnetwiderstandes benötigten Ampère-Windungen bedeuten und zwar mit Vernachlässigung der Streuung. Um auch die letztere in Rechnung zu ziehen, müssen später noch alle Ordinaten durch ν dividiert werden.

Zur Bestimmung der Ampère-Windungen, welche zur Kompensation des Übergangs-Widerstandes von den Polen zur Armatur und im Armatureisen selbst dienen, mag die oben angegebene Gleichung angewandt werden, indem wir für B_m eine möglichst grosse Zahl, z. B. 11000 einsetzen.

$$a\,w = 11000 \,.\, 390 \left(0{,}0005 \,.\, \frac{37}{220} + 0{,}8 \,.\, \frac{0{,}6}{631} \,.\, 0{,}9\right)$$
$$= \text{rund } 3290.$$

Diese Zahl ist noch mit ν zu multiplizieren:

$$1{,}2 \,.\, 3290 = 3950.$$

Man verbindet nun den Punkt e mit der Koordinaten 3950 und 11000 mit dem Punkte O und addiert vermittelst eines Zirkels die Abscissen der Geraden $e\,O$ zu den entsprechenden Abscissen der Kurve I; so erhält man Kurve III, welche als die gesuchte Charakteristik zu betrachten ist, nachdem man die Ordinatenskala für die direkte Ablesung in Volt neu einteilt.

Um für irgend eine Ordinate der früheren Skala die Spannung ablesen zu können, hat man den Wert mit

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{1470 \cdot 180 \cdot 390}{60 \cdot 10^8} = 0{,}0143$$

zu multiplizieren, was in der Skala *d* geschehen ist, und zwar ist hierin die Streuung bereits berücksichtigt.

Die im Vorausgegangenen dargelegte graphische Methode zur approximativen Ermittelung der Charakteristik ist selbstverständlich nur dann anwendbar, wenn die Magnete entweder ganz aus Schmiedeeisen oder ganz aus Gusseisen hergestellt sind und längs des ganzen magnetischen Kraftlinienlaufes gleichen Querschnitt besitzen.

B. Bestimmung des Spannungsabfalles von Nebenschlussmaschinen.

Picou giebt in seinem Buche „Traité des Machines Dynamos-électriques“ eine sehr hübsche Methode an. Die Fig. 132 stellt die Charakteristik einer Nebenschlussmaschine, bezogen auf Erregerstromstärke und E.M.K. dar; E sei die Spannung, mit welcher die Maschine selbst erregt bei nahezu stromloser Armatur läuft. Dann ist

$$\frac{E}{i} = tg\,\alpha = r \text{ (Widerstand der Magnete)}$$

und

$$i = \frac{E}{r}.$$

Verbindet man E mit O, so kann die Erregerstromstärke für irgend eine beliebige Bürstenspannung gefunden werden, indem man die jener Spannung entsprechende Abscisse der Geraden OE bestimmt.

Es sei nun zu untersuchen, um wieviel die Spannung E bei einer gewissen Armaturstromstärke J und einem Armaturwiderstand R sinke. Zu diesem Zwecke mache man e (siehe Fig. 132) $= J\,(R + R_1)$. Hierbei bedeutet $J R_1$ den mutmasslichen Spannungsabfall, hervorgerufen durch die Armaturreaktion, und muss schätzungsweise angenommen werden; kleinere Fehler in der Annahme derselben sind übrigens von wenig Einfluss auf das endgültige Resultat. Wo genauere Anhaltspunkte über dessen Grösse fehlen, kann man ihn ungefähr $= J R$ annehmen.

Den Punkt A verbinde man mit O und ziehe durch E parallel zu AO die Gerade $E E_1$.

E_1 entspricht dem Punkt, auf welchen die ursprüngliche Spannung E lediglich infolge des Spannungsverlustes in der Armatur sinkt. Nun

folgt aber eine sekundäre Erscheinung. Gleichzeitig hat sich auch Erregerstromstärke geändert. Statt i beträgt sie nur noch $\frac{E_1}{r} = i_1$. I findet sie, wenn man durch E_1 eine Horizontale bis zur Geraden (zieht und das Lot fällt.

Die neue Stromstärke i_1 erzeugt aber eine Spannung E', c wenn man davon e auf die bereits erläuterte Weise abzieht, so erg sich als zweiter Annäherungswert die Spannung E_2.

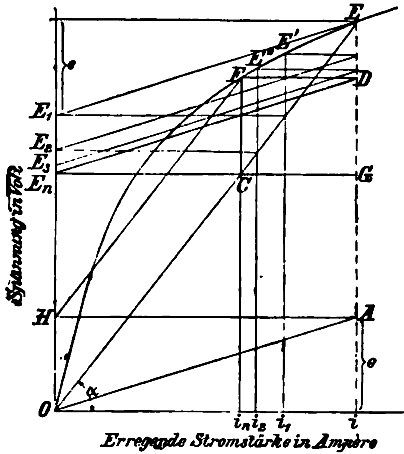


Fig. 132.

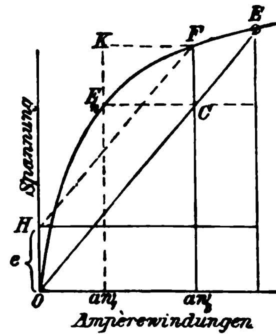


Fig. 133.

Fährt man auf diese Weise weiter fort, so erhält man schliess die geschlossene Figur

$$E_n D F C,$$

und es ist leicht einzusehen, dass

$$F C = D G = e$$

sein muss.

Dies führt uns aber sofort zu einer bedeutend einfacheren Lö der Aufgabe. Zieht man nämlich $F H$ parallel $O E$, so ist, wie ersi lich, $H O = e$.

Man braucht daher bloss, wie dies in Fig. 133 geschehen $O H = e$ zu machen, durch den Punkt H eine Parallele zu O I ·hen und vom Schnittpunkt F mit der Charakteristik das Lot Abscissenaxe zu fällen, so ist C die gesuchte Spannung der Masc die entsprechende Erregung der Magnete.

Die Kurve zeigt nun auch, dass der Spannungsabfall um so gr lt, je niedriger der Sättigungsgrad der Maschine ist.

soeben behandelte Methode hat allerdings mehr theoretisch Bedeutung, da auch eine approximative Vorausberechn

JR_1 zu den Dingen der Unmöglichkeit gehört. In einer Beziehung aber gewährt sie einen sehr interessanten Einblick in die Wirkungsweise der Nebenschlussmaschinen. Wir machen nämlich an der Hand der Fig. 134 die Beobachtung, dass die Gerade HF die Charakteristik in 2 Punkten G und F schneidet mit den Klemmenspannungen C' u. C.

Nebenschlussmaschinen zeigen somit das eigentümliche Verhalten, dass sie für die nämliche Stromstärke mit 2 verschiedenen Klemmenspannungen laufen können.

Die grösste Stromstärke entspricht ferner dem Schnittpunkte K der Tangente LK an die Charakteristik. Die Abhängigkeit der Armaturstromstärke von der Klemmenspannung ist in Fig. 135 dargestellt, die sich ohne weiteres aus Fig. 134 ergiebt. Theoretisch müssten die Kurven wieder nach dem Koordinatenanfangspunkte zurückkehren,

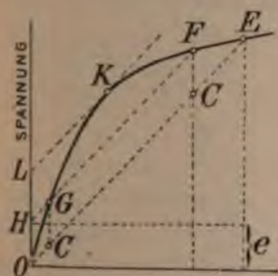


Fig. 134.



Fig. 135.

infolge des permanenten Magnetismus nimmt sie jedoch den durch die vollausgezogene Linie markierten Verlauf.

Wir ziehen aus dem Gesagten folgenden Schluss: Wird der äussere Widerstand successive verringert, so nimmt die Armaturstromstärke im Anfange zu bis zu einem gewissen maximalen Werte, worauf sie wieder successive abnimmt. Bei einer guten Maschine ist es wohl kaum möglich, den ganzen Verlauf dieser Kurve experimentell zu verfolgen, da man Gefahr läuft, die Maschine vorher zu verbrennen, dagegen lassen sich immerhin einige Punkte des umgebogenen Teiles der Kurve durch entsprechend starke Widerstandsverringerungen ermitteln. Dieser Fall kann sogar unbeabsichtigter Weise eintreten, wenn man Überlastungsversuche anstellt und auf einmal einen zu grossen Widerstand ausschaltet.

Gerade infolge dieser Eigenschaft bieten Nebenschlussmaschinen gegenüber Serie- oder Kompoundmaschinen den schätzenswerten Vorteil, dass sie bei plötzlichem Kurzschluss ihren Strom verlieren, oder wenigstens auf einen ungefährlichen Betrag reduzieren. Die einzige Gefahr liegt darin, dass die Wicklung in mechanischer Beziehung Schaden leidet.

C. Bestimmung einer Kompound-wicklung.

Die Lösung dieser Aufgabe ist äusserst einfach. Fig. 136 sei die Charakteristik der fraglichen Maschine, bezogen auf erregende Ampère-Windungen und E.M.K.

Die Nebenschlusswicklung sei in diesem Falle an die Leitungsklemmen gelegt (Fig. 72).

E soll die Bürstenspannung bedeuten, die man konstant zu halten wünscht.

Sucht man den Punkt E auf der Charakteristik und fällt das Lot, so wird durch die Abscisse dieses Punktes aw die Zahl der Ampère-Windungen bestimmt, welche bei Leerlauf erforderlich ist, d. h.

Fig. 136.

Fig. 137.

die Ampère-Windungen der Nebenschlusswicklung. In diesem Falle ist E nicht nur Bürstenspannung, sondern auch E.M.K.

Ist e wiederum der Spannungsverlust in der Armatur + dem mutmasslichen Spannungsabfall durch Armaturreaktion, so muss folglich eine E.M.K. oder interne Spannung E_1 in der Maschine erzeugt werden, welche um diesen Betrag höher ist.

Die hierzu erforderlichen Ampère-Windungen sind aber nach der Fig. 136 aw_1; hieraus ergeben sich die Ampère-Windungen der Kompoundwicklung $= aw_1 - aw$.

Bei der Schaltung Fig. 73 nimmt die Spannung an den Klemmen des Nebenschlusses mit wachsender Belastung zu. Nehmen wir an, sie wachse von E auf E_2, so sind der Seriewicklung noch $aw_1 - \frac{E_2}{E} aw$ Ampère-Windungen zu geben.

D. Bestimmung von Nebenschluss-regulatoren.

Nebenschlussregulatoren können verschiedenartigen Zwecken dienen:

a) zur Erreichung einer konstanten Bürstenspannung bei variabler Belastung, jedoch konstanter Tourenzahl;

b) um die Bürstenspannung gleich zu erhalten, wenn die Tourenzahl variiert;

c) um den Einfluss von Belastung und Tourenschwankung zugleich auszugleichen;

d) um irgendwelche Variation in der Spannung zu bewirken.

Aufgabe a): Regulierung von Nebenschlussmaschinen bei verschiedener Belastung.

Es sollen mit Bezug auf Fig. 137 folgende Bezeichnungen gelten:

E Bürstenspannung,

r_m Widerstand der Magnete,

r_w „ des Nebenschlussregulators,

m Anzahl der Windungen pro magnetischen Stromkreis.

Es sei vorausgesetzt, man verfüge über einen die Dynamo antreibenden Motor von genau konstanter Tourenzahl, und die Disposition werde so getroffen, dass bei vollem Strom aller Widerstand im Regulator ausgeschaltet sei.

Es ist nun zu untersuchen, wieviel Widerstand den Magneten vorgeschaltet werden muss, damit die Spannung bei Leerlauf genau die gleiche wie bei vollem Strom bleibe. Man bestimmt zunächst die Erregerstromstärken für Leerlauf (i_1) und vollen Strom (i_2), und zwar auf die soeben unter C. behandelte Weise, indem man die Ampère-Windungen für die Spannung E und $E+e$ aufsucht. Dann ist

$$i_1 = \frac{aw_1}{m},$$

$$i_2 = \frac{aw_2}{m}.$$

Ferner

$$r_m + r_w = \frac{E}{i_1} = \frac{mE}{aw_1} = m\,tg\,\alpha_1,$$

$$r_m = \frac{E}{i_2} = \frac{mE}{aw_2} = m\,tg\,\alpha_2.$$

Die Werte von r_m und $r_m + r_w$ lassen sich aber auch direkt ableiten. Man braucht nämlich nur zur Ordinatenaxe im Abstande m eine Parallele zu ziehen. Dieselbe schneidet die Geraden EO und

KO in den Punkten E_1 und E_2 und es gilt selbstverständlich auch für diese Punkte die Beziehung

$$m \, tg \, \alpha_1 = \frac{m E_1}{m} = E_1 = r_m + r_w,$$

$$m \, tg \, \alpha_2 = \frac{m E_2}{m} = E_2 = r_w.$$

Die Längen von E_1 und E_2 geben also ein direktes Mass für die Grössen der Widerstände. Der gesuchte Vorschaltwiderstand ist dann gleich

$$E_1 - E_2 = r_w,$$

Beispiel. Eine Nebenschlussmaschine für 100 V. und 50 Amp. mit den in Fig. 138 gekennzeichneten magnetischen Eigenschaften ist samt dem zugehörigen Regulierwiderstande derart zu disponieren, dass die Spannung sowohl bei Leerlauf, als bei voller Belastung konstant gehalten werden kann.

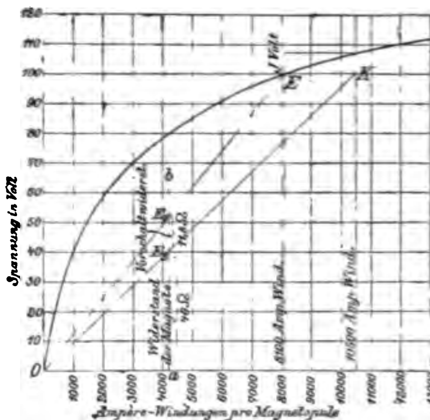


Fig. 138.

Spannungsabfall bei 50 Amp. = 7 V[1].

Die Charakteristik zeigt, dass bei Leerlauf $a w_1 = 8100$, bei voller Belastung $a w_2 = 10500$ Ampère-Windungen erforderlich sind.

Lassen wir einen Stromverlust in der Wicklung von 5% der gesamten Stromstärke zu, so müssen folglich die Magnete mit je

$$\frac{10500}{0,05 \, . \, 50} = 4200 \text{ Windungen}$$

versehen werden.

Die weitere Rechnung ergiebt dann

$$r_m + r_w = \frac{m \, . \, E}{a w_1} = \frac{4200 \, . \, 100}{8100} = 51,8 \; \Omega.$$

$$r_m = \frac{m \, . \, E}{a w_2} = \frac{4200 \, . \, 100}{10500} = 40,0 \; \Omega.$$

$$r_w = 51,8 - 40,0 = 11,8 \; \Omega.$$

Diese Zahlen lassen sich noch mit ziemlicher Genauigkeit ablesen, wenn man im Abstande

$$m = 4200$$

die Parallele ab zur Ordinatenaxe zieht und die Schnittpunkte E_1 und E_2 aufsucht. Da die Maschine bei Leerlauf gewöhnlich schneller läuft, empfiehlt es sich, den Vorschaltwiderstand etwas grösser zu bemessen, sagen wir 14 Ω statt 11,8 Ω.

[1]) In Fig. 138 lese man 7 Volt statt J Volt.

Besitzt die Maschine zwei Magnetspulen von 0,52 m mittlerer Windungslänge, so ist dem Magnetdraht ein Querschnitt von

$$\frac{2\,m\,.\,\mathfrak{L}}{50\,.\,r_m} = \frac{2\,.\,4200\,.\,0{,}52}{50\,.\,40} = 2{,}18 \text{ mm}^2$$

zu geben.

Aufgabe b): Regulierung von Nebenschlussmaschinen auf konstante Spannung bei verschiedener Tourenzahl.

Wir wollen zunächst der Einfachheit halber vorraussetzen, die Maschine laufe leer oder wenigstens mit so geringem Strom, dass der Spannungsverlust thatsächlich vernachlässigt werden könne.

n = normale Tourenzahl,

n_1 = grösste und kleinste anormale Tourenzahl,

$$\frac{n_1}{n} = \gamma.$$

Je nachdem die Umdrehungsgeschwindigkeit eine Zunahme oder Abnahme erfährt, wird $\gamma >$ oder < 1 ausfallen.

Die Aufgabe kann für beide Fälle allgemein gelöst werden.

Um die Charakteristik der Maschine für die abnormale Tourenzahl zu erhalten, multipliziere man alle Ordinaten der ursprünglichen Charakteristik (Kurve I) in Fig. 139 und 140 mit γ. Kurve II von Fig. 139 zeigt dies für die Tourenvermehrung, Kurve II von Fig. 140 für die Tourenverminderung.

E sei die Spannung der Maschine für Selbsterregung und bei der normalen Tourenzahl n. Verbindet man E mit O durch eine Gerade, die man nach rückwärts hin verlängert, so entspricht der Schnittpunkt E_x derselben mit der Kurve II der Spannung, welche die Maschine bei der veränderten Tourenzahl annehmen würde. Es soll dies nur für eine Vergrösserung der Drehgeschwindigkeit nachgewiesen werden, da sich die Sache für eine Verminderung derselben ganz analog verhält.

Der Vorgang kann ungefähr folgendermassen gedacht werden: Im ersten Moment steigt die Spannung E lediglich zufolge der erhöhten Tourenzahl auf E_1; wie ersichtlich nimmt aber auch die Erregerstromstärke der Maschine zu und zwar in direktem Verhältnisse zu der Bürstenspannung. Die entsprechende magnetomorische Kraft steigt also von $a\,w$ auf $a\,w_1$. Dieser Erregung entspricht aber die Spannung E_2; die magnetomotorische Kraft erhöht sich nun neuerdings auf $a\,w_2$ etc. etc.

Es ist augenscheinlich, dass ein Gleichgewichtszustand im Schnittpunkte der Geraden EO mit der Kurve II eintreten muss.

Für die Lösung der gestellten Aufgabe bleiben nun allerding diese Vorgänge vollständig belanglos. Man wünscht ja im Gegentei die Spannung der Maschine konstant zu erhalten.

Zu diesem Zwecke sucht man auf den Kurven II diejenige Zah Ampère-Windungen, welche die Spannung E ergiebt. Diese ist aw

Man sieht sofort, dass eigentlich zur Lösung der Frage die Hilfs kurve II unnötig ist. Da nämlich die für die Spannung $E' = E$ au Kurve II angegebenen Ampère-Windungen übereinstimmen mit den jenigen zur Erreichung der Spannung

$$x' = \frac{E'}{\gamma} = \frac{E}{\gamma}$$

bei normaler Tourenzahl, so braucht man also bloss auf der Senkrechte aE den Punkt x im Abstande $\frac{E}{\gamma}$ von a aufzusuchen und die Parallel

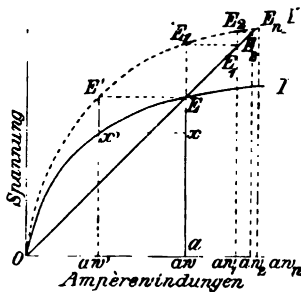


Fig. 139.

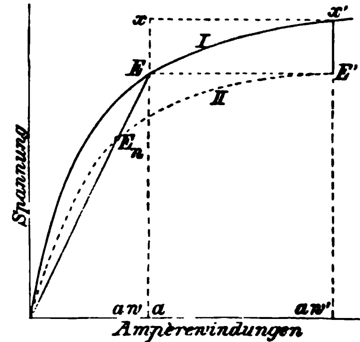


Fig. 140.

xx' zu ziehen. Die Abscisse des Schnittpunktes x' ist die gesucht Zahl Ampère-Windungen.

$$\text{Für } \gamma > 1 \text{ wird } aw' < aw,$$
$$\text{„ } \gamma < 1 \text{ „ } aw' > aw.$$

Im ersteren Falle muss also die Erregung durch Vorschalten vo Widerstand vor die Magnete vermindert werden, im letzteren ist e notwendig, durch Verringerung des gesamten Widerstandes im Neben schluss die Stromstärke zu steigern, was selbstverständlich nur möglic ist, wenn von Anfang an der Widerstand der Magnete so gewähl wird, dass schon bei normaler Geschwindigkeit ein gewisser Regulie widerstand r_w vorgeschaltet werden muss.

Diese Widerstände berechnen sich schliesslich wie folgt:

Für $n_1 > n$

$$r_m + r_w = \frac{E}{\frac{a\,w'}{m}}, \qquad r_m = \frac{E}{\frac{a\,w}{m}};$$

woraus

$$r_w = m\,.\,E\left(\frac{1}{a\,w'} - \frac{1}{a\,w}\right).$$

Für $n_1 < n$

$$r_m + r_w = \frac{E}{\frac{a\,w}{m}}, \qquad r_m = \frac{E}{\frac{a\,w'}{m}},$$

woraus

$$r_w = m\,E\left(\frac{1}{a\,w} - \frac{1}{a\,w'}\right).$$

Fig. 141.

Fig. 142.

Zieht man wie im vorigen Beispiel im Abstande m eine Parallele zur Ordinatenaxe, so lassen sich diese Widerstände wieder direkt ablesen.

Beispiel. **Eine Dynamo für 125 Amp. (Fig. 141) soll bei Leerlauf und Tourenschwankungen von 9 % unter und 10 % über normal auf 120 V. regulierbar sein. Wie sind die Magnete und der Vorschaltwiderstand zu bemessen, wenn in den Magneten ein Stromverlust von 3,2 % bei normaler Tourenzahl zugelassen werden soll?**

3,2 % Stromverlust entspricht 4 Amp.,

$$\textbf{Windungen pro Magnet} = \frac{20000}{4} = 5000 \text{ (siehe Fig. 141).}$$

Für erhöhte Tourenzahl ist

$$\gamma = 1{,}1; \qquad x_2 = \frac{1}{\gamma} \cdot 120 = 109.$$

Für verminderte Tourenzahl ist

$$\gamma = 0{,}91; \qquad x_1 = \frac{1}{\gamma} \cdot 120 = 132.$$

Ampère-Windungen bei erhöhter Tourenzahl = 15 400,
bei vermindeter „ = 27 600,

$$r_m + r_w = \frac{5000 \,.\, 120}{15400} = 39\ \Omega,$$

$$r_m = \frac{5000 \,.\, 120}{27600} = 21{,}8\ \Omega,$$

$$r_w = 39 - 21{,}8 = 17{,}2\ \Omega.$$

Vergleiche auch graphische Bestimmung von r_m und r_w.

Aufgabe c): Ausgleich von Belastungs- und Tourenschwankungen.

Der gesuchte Regulierwiderstand genügt offenbar allen Anforderungen, wenn man damit imstande ist, sowohl bei Leerlauf und der grössten Tourenzahl als auch bei maximaler Stromentnahme und kleinster Tourenzahl die Spannung konstant zu erhalten. Von diesen beiden extremen Fällen wurde der erstere bereits in Aufgabe b) erörtert.

Zur Lösung der letzteren Frage bedienen wir uns der in Fig. 142 dargestellten Kurve I für Leerlauf bei normaler Tourenzahl n, und II für die geringere Tourenzahl n_1

$$\frac{n_1}{n} = \gamma,$$

Ist E die gewünschte konstant zu haltende Bürstenspannung, für welche $a w_1$ Ampère-Windungen bei normaler Tourenzahl und Leerlauf (siehe Fig. 142) erforderlich sind, so findet man die magnetmotorische Kraft bei verminderter Armaturgeschwindigkeit, indem man für

$$E_1 = E + e$$

auf der Kurve II die Abscisse $a w_2$ aufsucht.

Man sieht übrigens sofort, dass zu diesem Zwecke die Hilfskurve nicht unumgänglich notwendig ist, da $a w_2$ ebensowohl Abscisse der Spannung E_1 auf der Kurve für verminderte Tourenzahl als der Spannung E_2 auf der Kurve für die normale Tourenzahl ist.

Dies führt zu folgender einfacheren Behandlungsweise der Aufgabe:

Man addiere zu E den Spannungsverlust e, dividiere die Summe durch γ und suche für die so erhaltene Spannung E_2 auf der ursprünglichen Charakteristik der Dynamo die zugehörige Zahl Ampère-Windungen.

Für die Berechnung des Drahtquerschnittes nehmen wir wieder die bereits bekannten Gleichungen 61—63 zu Hülfe.

m = Anzahl Windungen pro Spule,
m_1 = Anzahl hintereinander geschalteter Spulen,
$\mathfrak{L}$ = Länge einer Magnetwindung in m.

(Gl. 61) $$s = \frac{a\,w_2 \,.\, m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E \,.\, 50}.$$

(Gl. 63) $$m = \frac{a\,w_2}{\mathfrak{J}}.$$

Dies ist also der Querschnitt, welcher dem Magnetdrahte gegeben werden muss zur Erzielung der Bürstenspannung E bei minimaler Geschwindigkeit n_1 und maximalem Armaturstrom, wobei sämtlicher Regulierwiderstand ausgeschaltet ist.

Für den Leerlauf und bei der höheren Tourenzahl sind noch $a\,w_1$ Ampère-Windungen erforderlich. In diesem Falle ist den Magneten ein Widerstand r_w vorgeschaltet. Es ist nun

$$r_w = \frac{E\,m}{a\,w_1} - r_m$$

und

$$r_m = \frac{E\,m}{a\,w_2},$$

woraus sich

$$r_w = E\,m\left(\frac{1}{a\,w_1} - \frac{1}{a\,w_2}\right)$$

ergiebt, d. h. die uns bereits bekannte Formel.

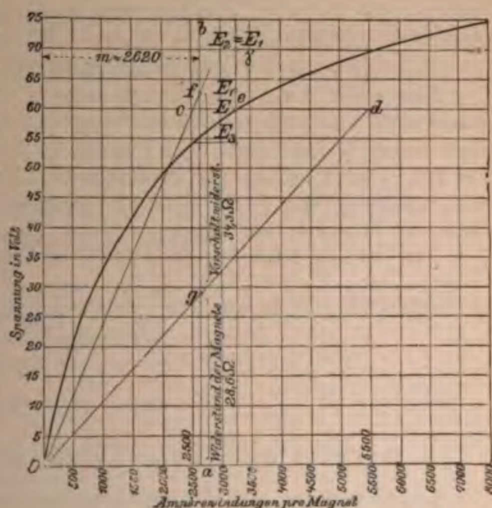


Fig. 143.

Beispiel. Es sei die Aufgabe gestellt, den Vorschaltwiderstand und die Wicklung einer Maschine von 60 V. Bürstenspannung (3 V. Spannungsverlust in der Armatur) und 30 Amp. so zu disponieren, dass die Bürstenspannung für irgendwelche Belastung bei 10 °/₀ Tourenschwankungen über und unter normal konstant gehalten werden kann.

Die Charakteristik dieser Maschine ist in Fig. 143 veranschaulicht.

a) Bestimmung der $a\,w$ bei minimaler Tourenzahl und maximalem Strom.

$$E_1 = E + \varepsilon = 60 + 3 = 63 \text{ V.};$$

$$\gamma = \frac{v_1}{v} = 0{,}9;$$

$$E_2 = \frac{E_1}{\gamma} = \frac{63}{0{,}9} = 70 \text{ V.};$$

$$a\,w_2 = 5500.$$

b) **Bestimmung der $a\,w$ bei maximaler Tourenzahl und Leerlauf**

$$\gamma = \frac{r_1}{r} = 1{,}1;$$

$$E_2 = \frac{E_1}{\gamma} = \frac{60}{1.1} = 54{,}4 \text{ V.};$$

$$a\,w_1 = 2500.$$

c) **Berechnung des Magnetdrahtquerschnittes und der Windungszahl für** $m_1 = 2$; $\vartheta = 0{,}5$ **m:**

$$s = \frac{5500 \,.\, 2 \,.\, 0{,}5}{60 \,.\, 50} = 1{,}83 \text{ mm}^2.$$

Gestattet man einen Stromverlust von $7\%_0 = 2{,}1$ Amp. in der Magnetwicklung, so ergiebt dies

$$\frac{5500}{2{,}1} = 2620 \text{ Windungen pro Spule.}$$

d) **Bestimmung des Vorschaltwiderstandes.**

Man ziehe durch die Schnittpunkte c und d der über den Abscissengrössen 2500 und 5500 errichteten Perpendikel mit der Parallelen durch E zur Abscissenaxe Gerade nach dem Punkte O, ferner errichte man im Abstande $m = 2620$ eine Parallele zur Ordinatenaxe. Man erhält auf diese Weise die Schnittpunkte g und f und es ist die Länge $a\,g$ gleich dem gesuchten Widerstande der Magnete, die Länge $g\,f$ gleich dem gesuchten Vorschaltwiderstand.

Das Resultat kann noch wie folgt kontrolliert werden.

$$r_m + r_w = \frac{m \,.\, E}{a\,w_1} = \frac{2620 \,.\, 60}{2500} = 62{,}9\ \Omega.$$

$$r_m = \frac{E}{i} = \frac{60}{2{,}1} = 28{,}6\ \Omega.$$

$$r_v = 62{,}9 - 28{,}6 = 34{,}3\ \Omega.$$

Aufgabe d): Änderung der Bürstenspannung.

Angenommen, die Bürstenspannung soll zwischen den Grenzen E_1 im Minimum und E_2 im Maximum reguliert werden können und zwar unabhängig von der jeweiligen Stromstärke in der Armatur.

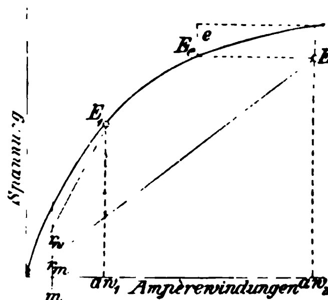


Fig. 144.

Dies wird unter allen Umständen erreicht, wenn man die Magnetwicklung und den Vorschaltwiderstand für folgende extreme Fälle dimensioniert:

Ohne Vorschaltwiderstand, Bürstenspannung $= E_2$.

Aller Widerstand vorgeschaltet, Bürstenspannung $= E_1$.

Aus der Charakteristik ergebe sich für E_1 eine magnetomotorische Kraft $a w_1$ Ampère-Windungen, für E_2 Volt an den Bürsten oder $E_2 + e$ Volt interne Spannung eine solche $= a\,w_2$.

Daraus finden wir gemäss dem soeben erörterten Querschnitt des Magnetdrahtes

$$s = \frac{a w_2 \,.\, m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E_2 \,.\, 50}.$$

Ferner

$$a w_2 = \frac{m E_2}{r_m},$$

$$a w_1 = \frac{m E_1}{r_m + r_w},$$

oder

$$r_w = m \left(\frac{E_1}{a w_1} - \frac{E_2}{a w_2} \right).$$

Direkt liesse sich dieser Widerstand wiederum ablesen, indem man, wie früher gezeigt wurde, im Abstande m eine Parallele zur Ordinatenaxe zieht (siehe Fig. 144).

E. Charakteristik für variable Spannung.

Die Lösung dieser Aufgabe ergiebt sich sofort aus der unter b im vorigen Kapitel behandelten Aufgabe.

Kurve I in Fig. 145 stellt die Charakteristik der Maschine bei normaler Tourenzahl n dar. Der Punkt E darauf bezeichnet die Spannung, mit welcher die Maschine selbst erregt laufen würde. Multiplizieren wir die Ordinaten dieser Kurven mit $\gamma = \frac{n_1}{n}$, wobei $\gamma >$ oder < 1 sein kann, so erhalten wir die Kurve II, und es ist E_1 der Schnittpunkt der Geraden OE mit der Kurve II die resultierende Spannung bei kurzgeschlossener Erregerspule für die Tourenzahl n_1.

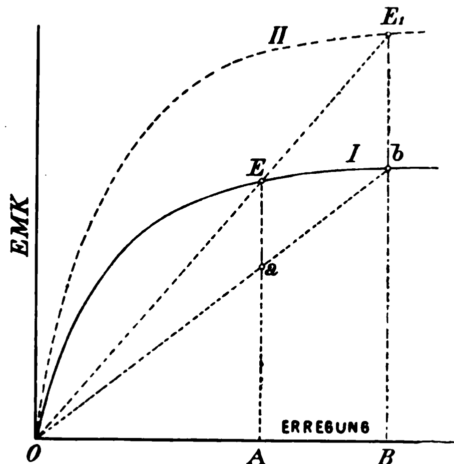


Fig. 145.

Fällt man von E_1 das Lot $E_1 B$, so folgt:

$$\frac{EA}{aA} = \frac{E_1 B}{bB} = \gamma \frac{n_1}{n}$$

oder

$$\frac{aA}{EA} = \frac{n}{n_1}$$

$$E_1 B = bB \cdot \frac{n_1}{n}.$$

Diese zwei Gleichungen führen uns zu folgender einfachen Lösung der gestellten Aufgabe (siehe Fig. 146): Wir nehmen auf der Geraden EA eine grössere Zahl von Punkten a_1, a_2 a_3 etc. mit den Ordinaten

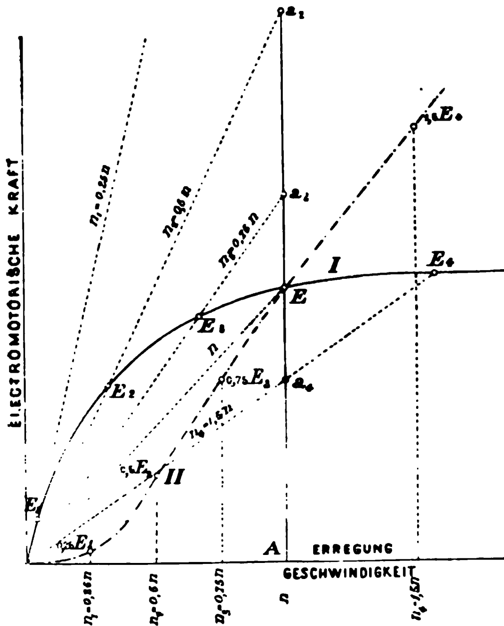


Fig. 146.

$$a_1 = \frac{n}{n_1} \cdot EA$$

$$a_2 = \frac{n}{n_2} \cdot EA$$

$$a_3 = \frac{n}{n_3} \cdot EA \text{ etc. an.}$$

Diese Punkte werden mit dem Koordinatenanfangspunkt O verbunden und die Schnittpunkte E_1 E_2 E_3 etc. mit der Charakteristik I bestimmt. Die resultierenden Endspannungen sind dann

für n_1 n_2 n_3

$$E_1 \frac{n_1}{n} \quad E_2 \frac{n_2}{n} \quad E_3 \frac{n_3}{n} \text{ etc.}$$

Dieselben sind durch die strichpunktierten Linien angegeben.

F. Elektrische Kraftübertragung mittelst zweier Serienmaschinen.

Die Bedingungen, welche hier zu erfüllen sind, wurden bereits auf Seite 83—87 entwickelt.

VI. Theorie der Kommutation.

A. Allgemeine Gleichung.

Die Leistungsfähigkeit einer Maschine ist, abgesehen von den nötigen mechanischen Eigenschaften, Erwärmung und Nutzeffekt, durch die Funkenbildung am Kommutator begrenzt. Während es ein Leichtes ist, den erst genannten Bedingungen mit grosser Genauigkeit zu genügen, so haben bisher alle Versuche gescheitert, welche darauf hinaus liefen, eine allgemeingiltige praktische Regel für die Kommutationsvorgänge aufzustellen. Der Grund liegt ganz einfach darin, dass man sich bei der Aufstellung derartiger Regeln gar zu sehr von dem Bestreben leiten liess, komplizierte Vorgänge durch einfache Gleichungen darzustellen, während der wissenschaftliche Standpunkt gewöhnlich ausser Acht gelassen wurde. Wir werden es nun in dem Nachstehenden versuchen, beiden Umständen möglichst Rechnung zu tragen.[1]) Hierbei muss bemerkt werden, dass die nachstehenden Formeln, streng genommen, nur für Generatoren, bei welchen die Bürstendicke γ (siehe Fig. 155) gleich oder kleiner als die Dicke einer Lamelle ist, Giltigkeit haben, doch darf als allgemeine Regel angenommen werden, dass Motoren unter gleichen Verhältnissen besser funktionieren, und dass die Vergrösserung der Bürstendicke fast immer eine Verbesserung der Maschine herbeiführt.

Es bezeichne:

L den Selbstinduktionskoeffizienten der kurzgeschlossenen Spule in Henrys,

J_s den Strom in der kurzgeschlossenen Spule,

J_1 und J_2 die Stromstärken an den Kommutatorsegmenten A resp. B,

r_1 und r_2 die variablen Kontaktwiderstände, welche in der Fig. 147 durch Vorschaltwiderstände angedeutet sind,

---

[1]) Es sei hier auf einen früheren Aufsatz des Verfassers in Heft 51 und 52 der Elektrotechnischen Zeitschrift 1898, verwiesen.

r_4 den Widerstand der Verbindungen zum Kommutator; für ge- wöhnlich, d. h. in allen Fällen, wo die Drähte direkt an d Kommutator angeschlossen werden, ist $r_4 = 0$,

J den gesamten Maschinenstrom,

$2p$ die Zahl der Pole,

$2p_1$ die Zahl der parallel geschalteten Stromkreise,

T die Dauer des Kurzschlusses in Sekunden,

E_t den momentanen Wert der Gegen E.M.K., erzeugt durch V schiebung der Bürsten,

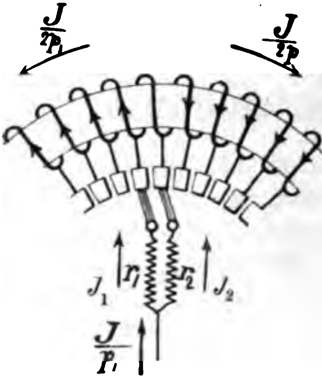


Fig. 147.

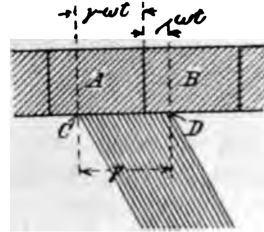


Fig. 148.

ϱ den spezifischen Kontaktwiderstand der Bürsten,

l_1 die Länge der Bürsten (axial gemessen) in cm,

ω die Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators in cm.

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetze wird nun

$$L\frac{dJ_3}{dt} + J_3 r_3 + E_t + J_1\left(r_1 + \frac{r_4}{2}\right) - J_2\left(r_2 + \frac{r_4}{2}\right) = 0 \tag{93}$$

$$J_1 = \frac{J}{2p_1} + J_3 \tag{94}$$

$$J_2 = \frac{J}{2p_1} - J_3. \tag{95}$$

Ferner mit Bezug auf Fig. 148

$$r_1 = \frac{\varrho}{l_1(\gamma - \omega t)} \tag{96}$$

$$r_2 = \frac{\varrho}{l_1 \omega t} \tag{97}$$

Der Einfachheit halber setzen wir

(98) $$\frac{\omega t}{\gamma} = \frac{t}{T} = x,$$

also $$dt = T dx,$$

ferner

(99) $$r = \frac{\varrho}{J_1 \gamma}$$

(100) $$\frac{r T}{L} = \vartheta$$

(101) $$r_3 + r_4 = \alpha r,$$

so folgt:

(102) $$r_1 = \frac{r}{1-x}$$

(103) $$r_2 = \frac{r}{x}$$

Führen wir die Werte von J_1, J_2 und J_3 aus Gleichung (94) und (95) ferner dt aus Gleichung (98) und r_1, r_2 aus Gleichung (102) und (103) in Gleichung (93) ein, so erhält dieselbe nachstehende Formen:

(104) $$dJ_3 + J_3 \vartheta \left(\alpha + \frac{1}{1-x} + \frac{1}{x} \right) dx + \vartheta \frac{E_t}{r} dx + \frac{J}{2p_1} \vartheta \left(\frac{1}{1-x} - \frac{1}{x} \right) dx = 0$$

(105) $$dJ_1 + J_1 \vartheta \left(\alpha + \frac{1}{1-x} + \frac{1}{x} \right) dx + \vartheta \frac{E_t}{r} dx - \frac{J}{2p_1} \vartheta \left(\alpha + \frac{2}{x} \right) dx = 0$$

(106) $$dJ_2 + J_2 \vartheta \left(\alpha + \frac{1}{1-x} + \frac{1}{x} \right) dx - \vartheta \frac{E_t}{r} dx - \frac{J}{2p_1} \vartheta \left(\alpha + \frac{2}{(1-x)} \right) dx = 0.$$

Bringt man diese Gleichungen auf die allgemeine Form

$$dJ + J f(x) dx + \varphi(x) dx = 0,$$

so berechnet sich hieraus

$$J = -e^{-\int f(x)\,dx} \int . \varphi(x) . e^{+\int f(x)\,dx} . dx.$$

$$e = 2{,}718.$$

Es wird also beispielsweise:

$$(107)\quad J_1 = -\left(\frac{1-x}{x}\right)^{\vartheta} . e^{-\vartheta a x} \int \left(\left(\frac{E_t}{r} - \frac{J}{2p_1}\left(a + \frac{2}{x}\right)\right)\vartheta \left(\frac{x}{1-x}\right)^{\vartheta} e^{\vartheta a x} . dx.\right.$$

Diese Gleichungen lassen sich nötigenfalls durch Entwicklung in unendliche Reihen integrieren. Damit wird jedoch nicht viel gewonnen, denn die Rechnung würde, wie leicht einzusehen, viel zu umständlich, hauptsächlich für Werte von x in der Nähe von Eins. Für die Untersuchung einer Maschine genügt es übrigens, wie später gezeigt werden soll, den Anfang und das Ende der Stromkurve zu untersuchen. Wünscht man jedoch die ganze Stromkurve aufzuzeichnen, so wird die folgende Methode ungleich schneller zum Ziele führen. Wenn nämlich der Wert dt nicht unendlich klein, aber immerhin so klein gewählt wird, dass die Änderungen in der Stromstärke dJ_3 praktisch während dieses kleinen Zeitintervalles als konstant aufgefasst werden dürfen, so können wir in Bezug auf Fig. 149 folgende Beziehungen anschreiben:

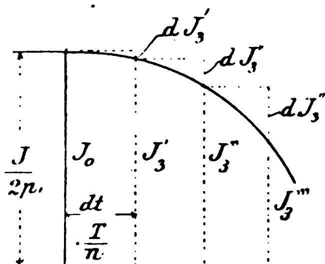


Fig. 149.

$$\begin{aligned} dJ_3' &= J_3' - J_0 \\ dJ_3'' &= J_3'' - J_3' \\ dJ_3''' &= J_3''' - J_3'' \quad \text{u. s. w.} \end{aligned}$$

Der Einfachheit halber mag ferner für

$$\left(\frac{1}{1-x} + \frac{1}{x}\right) dx = f(x)\, dx$$

und für

$$\left(\frac{1}{1-x}\right) dx = \varphi(x)\, dx$$

gesezt werden.

Es lässt sich nun E_t durch eine lineare Funktion darstellen, sofern nämlich die Bürstenverschiebung nicht allzu gross ist.

$$(108)\qquad E_t = A + A_1\, x.$$

$$(109)\qquad \frac{J_3'}{J_0} = \frac{\frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{J_0\, r}\left(A + A_1\, x'\right) dx - \varphi(x')}{\left(\frac{1}{\vartheta} + a\, dx\right) + f(x')\, dx}$$

$$10)\quad \frac{J''_3}{J_0} = \frac{\frac{J_3'}{J_0} \cdot \frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{J_0 r}\left(A + A_1 x''\right) d x - \varphi(x'')\, d x}{\left(\frac{1}{\vartheta} + \alpha\, d x\right) + f(x'')\, d x}$$

$$11)\quad \frac{J_3'''}{J_0} = \frac{\frac{J_3''}{J_0}\, \frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{J_0 . r}\left(A + A_1 x'''\right) d x - \varphi(x''')\, d x}{\left(\frac{1}{\vartheta} + \alpha\, d x\right) + f(x''')\, d x.}$$

A, A_1 und α sind konstante Größen, so lange die mittlere Bürsten-rschiebung nicht verändert wird, bezüglich x, $d x$, $\varphi(x)\, d x$ und $f(x) d x$, ag auf die nachstehende Tabelle verwiesen werden. Da es haupt-chlich darauf ankommt, den Anfang und das Ende der Kurve genauer kennen, so sind an diesen Stellen die Intervalle etwas kleiner ge-ählt.

Tabelle der Werte von x, $d x$, $\varphi(x)\, d x$ und $f(x)\, d x$.

Nr.	x	$d x$	$\varphi(x)\, d x$	$f(x)\, d x$
1	0,05	0,05	− 0,948	+ 1,052
2	0,10	0,05	− 0,445	+ 0,556
3	0,15	0,05	− 0,274	+ 0,392
4	0,20	0,05	− 0,187	+ 0,312
5	0,30	0,1	− 0,190	+ 0,476
6	0,40	0,1	− 0,083	+ 0,417
7	0,50	0,1	0	+ 0,400
8	0,60	0,1	+ 0,083	+ 0,417
9	0,70	0,1	+ 0,190	+ 0,476
10	0,80	0,1	+ 0,375	+ 0,625
11	0,85	0,05	+ 0,274	+ 0,392
12	0,90	0,05	+ 0,445	+ 0,556
13	0,92	0,02	+ 0,228	+ 0,272
14	0,94	0,02	+ 0,312	+ 0,355
15	0,96	0,02	+ 0,479	+ 0,521
16	0,97	0,01	+ 0,323	+ 0,344
17	0,98	0,01	+ 0,490	+ 0,510
18	0,99	0,01	+ 0,990	+ 1,010

Bei der Benutzung dieser Tabelle ist insbesondere genau auf die Vorzeichen von J_3 und $\varphi(x)$ zu achten, welche während der Operation wechseln.

Beispiel. Es sei

$$\vartheta = 2,$$
$$A = 1 \times J_0 r,$$
$$A_1 = 3 \times J_0 r,$$
$$\alpha = 2,$$

so haben wir für

$$x = 0{,}05 \quad \frac{J_s}{J_0} = \frac{0{,}5 - (1 + 3 \,.\, 0{,}05)\, 0{,}05 + 0{,}948}{0{,}5 + 0{,}1 + 1{,}052} = 0{,}858$$

$$x = 0{,}10 \quad \frac{J_s}{J_0} = \frac{0{,}5 \,.\, 0{,}858 - (1 + 3 \,.\, 0{,}1)\, 0{,}05 + 0{,}445}{0{,}5 + 0{,}1 + 0{,}556} = 0{,}70$$

$$x = 0{,}15 \quad \frac{J_s}{J_0} = \frac{0{,}5 \,.\, 0{,}7 - (1 + 3 \,.\, 0{,}15)\, 0{,}05 + 0{,}274}{0{,}5 + 0{,}1 + 0{,}392} = 0{,}556$$

$$x = 0{,}2 \quad \frac{J_s}{J_0} = \frac{0{,}5 \,.\, 0{,}556 - (1 + 3 \,.\, 0{,}2)\, 0{,}05 + 0{,}187}{0{,}5 + 0{,}1 + 0{,}312} = 0{,}366$$

$$x = 0{,}3 \quad \frac{J_s}{J_0} = \frac{0{,}5 \,.\, 0{,}366 - (1 + 3 \,.\, 0{,}3)\, 0{,}1 + 0{,}190}{0{,}5 + 0{,}2 + 0{,}476} = 0{,}1{,}55 \text{ u. s. w.}$$

oder in einer Tabelle zusammengestellt:

x	$\frac{J_s}{J_0}$	x	$\frac{J_s}{J_0}$	x	$\frac{J_s}{J_0}$	x	$\frac{J_s}{J_0}$
0,05	0,858	0,30	0,155	0,70	— 0,61	0,92	— 0,95
0,10	0,700	0,40	— 0,054	0,80	— 0,77	0,94	— 0,97
0,15	0,556	0,50	— 0,25	0,85	— 0,84	0,96	— 0,982
0,20	0,366	0,60	— 0,435	0,90	— 0,91	0,97	— 0,994

Anmerkung. Es hat im allgemeinen keinen Zweck, die Rechnung über $x = 0{,}9$ auszudehnen, da die letzten Zahlen notwendigerweise ungenau werden müssen, übrigens werden wir später sehen, wie dieses Stück der Kurve genauer bestimmt werden kann.

B. Ursachen der Funkenbildung.

Nach der ältern Anschauungsweise hat man die Funkenbildung als ausschliessliche Folge einer Stromunterbrechung zu betrachten. Diese Auffassung wurde zuerst von Thorburn Reid (Paper read before the American Inst. of Electr. Eng. 15. Dec. 1897) widerlegt und zwar erklärt Reid die Funkenbildung als Folge einer zu grossen Stromintensität an den Bürsten, während er den eigentlichen Unterfunken als harmlos hält. Eine genauere Prüfung der Gleichung (93) beziehungsweise der Gleichung (104) lässt nun erkennen, dass überhaupt kein Unterbrechungsfunken entstehen kann, es sei denn, dass der Lichtbogen bereits schon vor dem Unterbruch durch Abschmelzen des Metalles hergestellt wurde. Diese Behauptung gilt auch für gewöhnliche Ausschalter.

Lassen wir nämlich in Gleichung (104) x zunehmen, bis $(1 - x)$ den Wert dx annimmt, so geht die Gleichung über in

$$dJ_3 + J_3 \alpha \vartheta dx + J_3 \vartheta + J_3 \vartheta dx + \frac{E_T}{r} \vartheta dx + \frac{J}{2 p_1} \vartheta$$
$$- \frac{J}{2 p_1} \vartheta dx = 0.$$

Da aber alle Glieder, in welchen das Differential von J_3 und x vorkommt, unendlich klein sind, so bleibt nur noch

$$J_3 \vartheta + \frac{J}{2 p_1} \vartheta = 0$$

oder

$$J_3 \text{ (zur Zeit } t = T) = - \frac{J}{2 p_1}.$$

Diese Darstellung zeigt deutlich, dass die Stromstärke in der kurzgeschlossenen Spule für $t = T$ immer den Wert $- \frac{J}{2 p}$ annimmt, welches auch die Bürstenverschiebung und die elektrischen Verhältnisse der Maschine seien. Wenn also die Maschine trotzdem feuert, so rührt dies daher, dass die Stromintensität an einer der Lamellen schon vor dem Unterbruche des Kurzschlusses zu gross geworden ist, wodurch ein Abschmelzen der Kontaktfläche verursacht wird. Selbstverständlich folgt in diesem Falle die Kurzschlussstromstärke nicht mehr den abgeleiteten Gesetzen, sondern es entsteht ein Lichtbogen, welcher erst beim Verlassen der Lamelle unterbrochen wird.

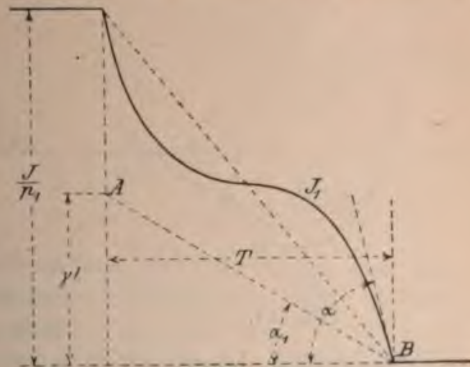


Fig. 150.

Eine kleine Prüfung der Stromkurven Fig. 150—152 lässt unschwer erkennen, dass die grösste Beanspruchung der Lamellen bei den üblichen Bürstenbeanspruchungen in der Regel entweder beim Beginn der Kommutation, d. h. an der auflaufenden Lamelle, oder, was noch häufiger eintrifft, im letzten Teile der Kommutation, und zwar an der Kante der ablaufenden Lamelle zu befürchten ist. Im ersten Falle entstehen die Funken unter den Bürsten und sind daher dem Auge weniger sichtbar, dagegen lässt sich nach kurzer Betriebsdauer eine

merkbare Erwärmung des Kommutators und eine Abnützung der Lamelle konstatieren. Lässt man die Maschine dagegen längere Zeit unter Belastung laufen, so werden nach und nach die Funken sichtbar, was daher kommt, dass die Auflagfläche der Bürsten allmählig verringert wird, so dass die Funken gegen die Bürstenspitze hin rücken.

Um daher zu unterscheiden, wo die grösste Beanspruchung auftritt, ist es ratsam, eine neue Maschine nur kurze Zeit ($^1/_4$ bis $^1/_2$ Stunden) laufen zu lassen und hierauf eine Prüfung der Kommutatorsegmente vorzunehmen. In ganz wenigen, ausnahmsweisen Fällen kann es auch vorkommen, dass die Lamellen in der Mitte angefressen sind, was sich aus dem Verlaufe der J_3-Kurve leicht ersehen lässt.

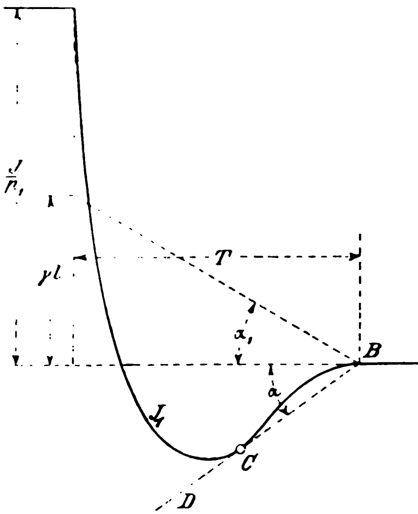


Fig. 151.

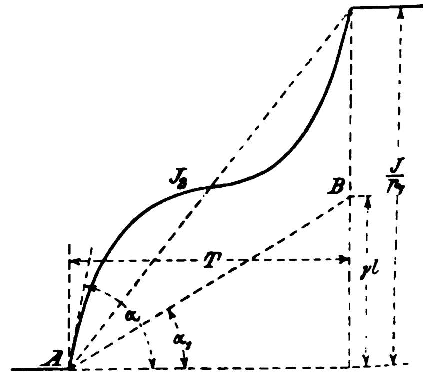


Fig. 152.

Um die Stromdichten i_1 und i_2 am Ende resp. Anfang der Kommutation aus den Hauptgleichungen zu bestimmen, kann in folgender Weise verfahren werden: Lassen wir in Gleichung (105) x gegen Eins zunehmen, so nimmt für $x = 1$ $\frac{J_1}{1-x}$ die Form $\frac{0}{0}$ an, deren reeller Wert leicht nach der Regel von Hospital bestimmt werden kann, indem man Zähler und Nenner differenziert.

$$\frac{J_1}{1-x} \text{ für } x = 1 = -\frac{dJ_1}{dx}.$$

Da wir in Gleichung (105) augenscheinlich die Glieder ϑ und $\frac{1}{x}$ im ersten Klammerausdruck gegenüber $\frac{1}{1-x}$ vernachlässigen können, bleibt, indem wir durch dx dividieren,

$$(112) \qquad \text{für } x = 1 \quad \frac{dJ_1}{dx} = -\frac{\frac{J}{2p}\left(\alpha+2\right)\vartheta - \frac{E_T}{r}\vartheta}{\vartheta - 1}$$

esgleichen finden wir auf analoge Weise für $x = 0$

$$(113) \qquad \frac{dJ_2}{dx} = \frac{\frac{J}{2p_1}\left(\alpha+2\right)\vartheta + \frac{\vartheta E_0}{r}}{\vartheta + 1} = 0.$$

Nun ist die Stromdichte in jedem Momente gleich der Stromstärke geteilt durch die Bürstenfläche (siehe Fig. 150 bis 152) oder

$$i_1 = \frac{J_1}{\gamma l_1 (1 - x)}.$$

Da im letzten Momente $(1 - x)$ zu dx wird, so folgt:

$$\gamma l_1 . i_1 \text{ für } (t = T) = -\frac{dJ_1}{dx},$$

dies in der Gleichung eingesetzt.

$$(114) \qquad i_1 . \gamma l_1 = \frac{\frac{J}{2p_1}\left(\alpha+2\right) . \vartheta - \vartheta \frac{E_T}{r}}{\vartheta - 1} = -\frac{dJ_1}{dx}.$$

Analog findet man

$$(115) \qquad i_2 \gamma l_1 = \frac{\frac{J}{2p_1}\left(\alpha+2\right)\vartheta + \vartheta \frac{E_{t=0}}{r}}{\vartheta + 1} = \frac{dJ_2}{dx}.$$

Gleichung (114) zeigt, dass ϑ von Eins verschieden sein muss, damit i_1 im letzten Momente der Kommutation einen endlichen Wert erhält. Es lässt sich jedoch, wie M. Girault[1]) zuerst gezeigt hat, nachweisen, dass unter allen Umständen $\vartheta > 1$ sein muss, damit $\frac{dJ_1}{dx}$ für $x = 1$ nicht unendlich wird. Dies geht nämlich unmittelbar aus Gleichung (107) hervor, welche sich folgendermassen schreiben lässt.

$$J_1 = -\frac{(1 - x)^{\vartheta}}{x} \cdot e^{-\vartheta a x} \cdot F.$$

Wie immer auch x, ϑ und α gewählt werden, so hat F stets einen von Null verschiedenen Wert. Da ferner der Bürstenquerschnitt

---

[1]) „Sur la commutation dans les dynamos à courant continu", Bulletin de la Soc. Intern. des Electriciens, Paris, Mai 1898.

gleich $\gamma l_1 (1 - x)$ ist, so ergiebt sich die Stromintensität zu einem beliebigen Momente.

$$i_1 = -\frac{(1-x)^{\vartheta - 1}}{x} \cdot e^{-\vartheta a x} \cdot \frac{F}{\gamma l_1}.$$

Wäre daher beispielsweise $\vartheta < 1$, so würde der Exponent negativ, und wir erhalten für $x = 1$

$$i_1 = \infty.$$

Rechnet man ϑ aus den Wicklungs- und Konstruktionsdaten der Maschinen aus, so ergiebt sich die eigentümliche Thatsache, dass diese Grösse sehr häufig bei durchaus gut funktionierenden Maschinen bedeutend kleiner als „1" ist. Insbesondere hält es bei Maschinen mit Metallbürsten sehr schwer, dieser Bedingung zu genügen, ohne dass die Maschinen deswegen feuern. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, dass der Widerstand der Kontakte schon bei der geringsten, vom Auge kaum bemerkbaren Funkenbildung ungemein rasch, und zwar auf das zehn- bis zwanzigfache, anwächst, bevor überhaupt ein eigentliches Feuern eintritt.

Die Gleichungen (114) und (115) können uns dazu dienen, die Grösse der E.M.K. zu bestimmen, welche in der Spule durch Verschiebung der Bürsten induziert werden. Setzen wir beispielsweise:

$$i_1 \text{ für } (t = T) = 0,$$

so würde nach Gleichung (114)

$$(116) \qquad E_T = \frac{J}{2 p_1}\left(a\, r + 2\, r\right) = \frac{J}{2 p_1} r_3 + \frac{J}{p_1} r$$

d. h. gleich dem Voltverlust in der Spule + demjenigen an einer Kontaktstelle. Diese Annahme entspricht nicht immer der günstigsten Bedingung bezüglich Funkenbildung, da sie, wie schon die Ableitung zeigt, nur für den letzten Teil der Kurve zutrifft und dem Anfang derselben keine Rücksicht trägt.

Nehmen wir an, es sei der Wert $\vartheta = \frac{r\,T}{L}$ möglichst klein, wobei für r aus den oben angedeuteten Gründen ein entsprechend grösserer Betrag in Gleichung (116) eingesetzt werden muss, als sich aus den Bürstendimensionen und dem spezifischen Widerstande ergeben würde, so kann leicht eine Kurve von der Gestalt Fig. 151 entstehen. Die maximale Beanspruchung tritt also schon während des Kurzschlusses ein und führt gewöhnlich zu starker Funkenbildung. Ebenso kann es auch vorkommen, dass unter diesen Verhältnissen die Kurve im Anfang fast horizontal verläuft und erst im letzten Teilstücke plötzlich *abfällt, wodurch* die Lamellen ebenfalls in der Mitte angefressen werden.

Am einfachsten ist es daher, während der ganzen Kommutation eine konstante Stromdichte vorauszusetzen. Die Gleichungen (114) und (115) ergeben hierfür

$$E_T = \frac{J}{p_1}\left(\frac{\alpha \cdot r}{2} + \frac{L}{T}\right). \tag{117}$$

$$E_{t=0} = \frac{J}{p_1}\left(-\frac{\alpha \cdot r}{2} + \frac{L}{T}\right). \tag{118}$$

$$E_m = \frac{J}{p_1} \cdot \frac{L}{T}. \tag{119}$$

E_m dient nur dazu, die mittlere Bürstenverschiebung zu berechnen.

Es ist nun allerdings nachträglich an Hand der Feldgestaltung zu kontrollieren, ob die wirklichen Werte von E_T und E_0 für die, E_m entsprechende, mittlere Bürstenstellung nicht zu sehr von den Werten der Gleichungen (117) und (119) abweichen.

C. Werte von α, r, T und L.

1. Bestimmung von α und r.

Nach Gleichung (101) ist:

$$\alpha = \frac{r_3 + r_4}{r}.$$

Bei den meisten Maschinen erhält jedes Kommutatorsegment 2 Drähte, oder es sind wenigstens die Verbindungen so kurz, dass sie gegenüber dem Spulenwiderstande vernachlässigt werden dürfen. Wir können also, ohne grosse Fehler zu begehen, r_4 einfach gleich Null setzen, so dass

$$\alpha = \frac{r_3}{r} \text{ wird.}$$

Bedeutet E die Klemmenspannung der Maschine,
N_2 die Anzahl Kommutatorsegmente,
$100 \cdot \varepsilon$ den prozent. Voltverlust in der Armatur,
(ε variiert zwischen 0,01 — 0,05)
J den gesamten Maschinenstrom, so ist:

$$r_3 = \frac{4 p_1{}^2 \varepsilon}{N_2 \cdot J}. \tag{120}$$

Ferner ist nach früherem

$$r = \frac{\varrho}{l_1 \gamma},$$

	Umfangs-geschwindigkeit	Bürstendruck kg pro cm^2	Voltverlust
Pierron	7,8 m	—	1,18
Prof. Arnold	8,1	0,120	1,34
Dettmar	9,3	—	2,80
Cox u. Buck	—	0,138	8,50

Es ist augenscheinlich, dass die Zahlen von Cox & Buck, welche älteren Datums sind, für die heute fabrizierten Kohlenbürsten nicht mehr gelten, dagegen ist anderseits einleuchtend, dass die in der Praxis angewandte Regel, bei Kohlenbürsten ca. 15 mm^2 pro Ampère vorzusehen, nur für Maschinen mit hoher Spannung zulässig ist und dass man bei Maschinen von nur 100—120 Volt bedeutend grössere Kontaktflächen anwenden sollte, um den Nutzeffekt nicht allzusehr zu verschlechtern.

Was die Versuche von Prof. Arnold und Pierron anbelangen, so sind hierzu vorzüglich eingeschliffene Bürsten benutzt worden. Pierron hat sogar seine Versuche an einem spec. Apparat mit Schleifringen angestellt. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass der Kontaktwiderstand für gewöhnliche Verhältnisse etwas grösser ausfällt. Wir werden daher den nachstehenden Rechnungen ungefähr die von Dettmar angegebenen Zahlen zu Grunde legen, d. h.

$\varrho = 0{,}2$ für Kohlenbürsten,

$\varrho = 0{,}02$ „ Kupferbürsten.

2. Berechnung von T.

Es sei D_2 der Durchmesser des Kommutators,

n die Tourenzahl,

γ die Dicke einer Bürste an der Kontaktstelle gemessen,

γ_1 die Dicke einer Kommutatorlamelle.

(121) $$T = \frac{\gamma \, . \, 60}{D_2 \pi \, . \, n} = \frac{\gamma}{\gamma_1} \, . \, \frac{60}{N_2 \, . \, n}.$$

Zu bemerken ist hier, dass für Maschinen mit Serieparallelwicklung nach Prof. Arnold für $\frac{\gamma}{\gamma_1}$ mindestens „1“ gesetzt werden muss, gleichviel ob der reelle Wert des Bruches kleiner als 1 ist.

3. Berechnung von L.[1]

So schwierig es auf den ersten Blick scheinen möchte, diese Grösse einigermassen genau zu bestimmen, so ist diese Schwierigkeit zumeist

[1] *Siehe* E.T.Z., Heft 52, 1898.

nur für die glatten Armaturen vorhanden, bei denen man sich daher mit einer mehr oder weniger grossen Annäherung begnügen muss; für die Zackenarmaturen liegen die Verhältnisse ungleich günstiger und die Rechnung kann schon mit bedeutend grösserer Genauigkeit erfolgen.

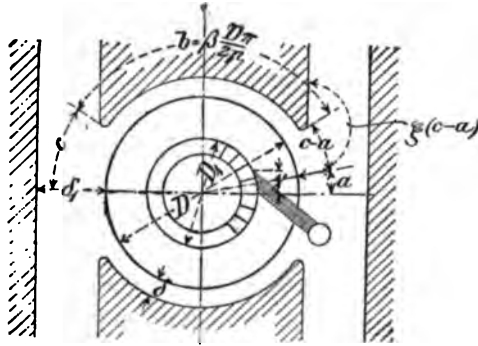


Fig. 153.[1])

Legen wir uns zunächst die Frage vor, was überhaupt die Grösse L in unserm Falle bedeutet. Die Erklärung ergiebt sich unmittelbar aus Gleichung (93), worin wir mit

$$L \frac{d J_3}{d t} = \frac{d \Phi}{d t} 10^{-8}$$

die induzierte Spannung in Volt bezeichnet haben.

Das Produkt $L \, d J_3$ bedeutet folglich die Summe der Kraftlinien, welche um jeden einzelnen Leiter der kurzgeschlossenen Spule kreisen, dividiert durch 10^8. Greifen wir z. B. den einfachen Fall einer Zackenarmatur heraus (Fig. 154). Ein Blick auf die Figur belehrt uns, dass wir es hier mit drei verschiedenen Feldern Φ_1, Φ_2 und Φ_3 zu thun haben, wovon das erste, Φ_1, durch die gesamte Zahl der Ampèrewindungen erzeugt wird, welche zwischen zwei neutralen Zonen liegen (Armaturreaktion); für die beiden letztern, Φ_2 und Φ_3 dagegen kommen augenscheinlich nur die Ampèrewindungen einer einzelnen Zacke in Betracht. Dementsprechend werden wir den Selbstinduktionskoeffizienten L als die Summe dreier partieller Selbstinduktionskoeffizienten L_1, L_2 und L_3 betrachten, welche einzeln zu berechnen sind.

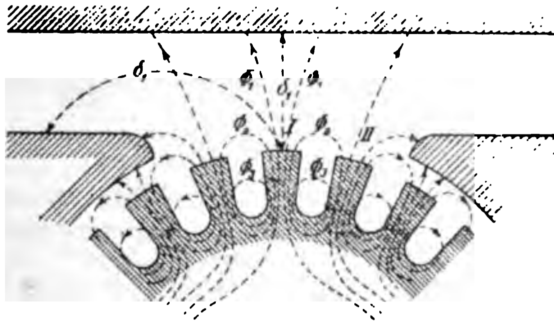


Fig. 154.

Es sollen hierfür folgende Bezeichnungen gelten, welche zum Teil bereits vorgekommen sind.

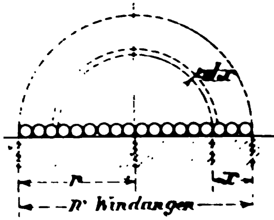
---

[1]) In Fig. 153 lese man D_2 statt D_1.

D der äussere Armaturdurchmesser in cm,
l die Armaturlänge,
N die totale Zahl Drähte rings um die Armatur.
N_1 die Anzahl Zacken,
N_2 „ „ Kommutatorsegmente,
w „ „ Windungen pro Zacke,
$2p$ „ „ Pole.
$2p_1$ „ „ parallel geschalteter Stromkreise,
k „ „ Windungen pro cm Länge.

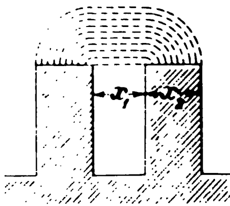
Bezüglich x_1, x_2 und y siehe die nachstehenden Figuren 156 bis 158.

Wie immer auch die Armaturkonstruktion gewählt werde, so lässt sich die Rechnung der einzelnen Selbstinduktionskoeffizienten auf einen der vier nachfolgenden Grundfälle zurückführen.


Fig. 155.

a. Glatte Armaturen.

$$L = \int_0^r \frac{4\pi}{10} 2(r-x)k \frac{l\,dx}{(r-x)\pi} \cdot \frac{2(r-x)k}{10^8} = \frac{0{,}8}{10^8} l k^2 r^2 = \frac{0{,}2}{10^8} w^2 l. \qquad (122)$$


Fig. 156.

b. Zackenarmaturen.
(Äussere Streuung):

$$L = \int_0^{x_2} \frac{4\pi}{10} \cdot w \cdot \frac{l\,dx}{x\pi + x_1} \cdot \frac{w}{10^8} = \frac{0{,}92}{10^8} \cdot w^2 l . \log_{10}\left(\frac{x_2\pi + x_1}{x_1}\right). \qquad (123)$$

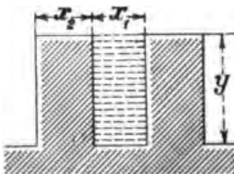


Fig. 157.

(Streuung im Innern):

$$L = \int_0^y \frac{4\pi}{10}(y-x)k \frac{l\,dx}{x_1} \cdot \frac{(y-x)k}{10^8} = \frac{0{,}42}{10^8} w^2 \frac{ly}{x_1}. \qquad (124)$$

c. Halbgeschlossene Zackenarmaturen.
(Streuung zwischen den Zackenspitzen.)

(125) $$L = \frac{1,26}{10^8} \cdot w^2 \frac{a\, l}{x_1}.$$

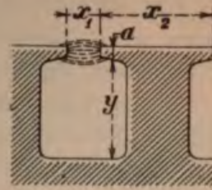


Fig. 158.

Wir haben schliesslich noch die Streuung nach den Polecken oder Magnetbügeln zu berücksichtigen, und zwar mag hier bemerkt werden, dass dieselbe in vielen Fällen sehr grosse Werte annehmen kann.

Nennen wir B' die maximale Kraftliniendichte in der neutralen Zone, erzeugt durch die Armaturreaktion, so ist

(126) $$B' = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J\, N}{2p \,.\, 2p_1} \cdot \frac{1}{2\,\delta_1}.$$

Für die Grösse δ_1 ist je nach der Konstruktion der Maschine die Kraftlinienlänge nach den Magnetbügeln oder, falls die Pole näher liegen, nach den Polecken einzusetzen (siehe Fig. 154).

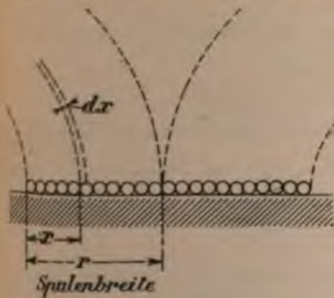


Fig. 159.

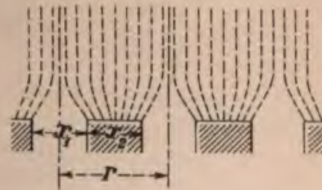


Fig. 160.

Daraus ergiebt sich für glatte Armaturen

(127) $$L = \int\limits_{x=0}^{x=r} \frac{B'\, l (r - x)\, k \,.\, d\,x}{\frac{J}{2p_1} \cdot 10^8} = \frac{0,16}{10^8} \cdot \frac{N}{p} \cdot \frac{l \,.\, r}{\delta_1} w.$$

Bei Zackenarmaturen wird die Rechnung schon etwas unbestimmter, da die Kraftlinienverteilung an den Zacken und in den Nuten nicht die gleiche ist. Um die Rechnung daher möglichst einfach zu gestalten, gehen wir von der Hypothese aus, dass die Kraftlinien allein nur an den Zacken austreten und sich im Luftraum regelmässig verteilen. (Siehe Fig. 160.)

Es wäre dann:

(128) $$L = B' \frac{r\, l}{2}\, w\, \frac{1}{10^8} = \frac{0,16}{10^8} \frac{N}{p} \cdot \frac{l \,.\, r}{\delta_1} w$$

d. h. wir gelangen zum gleichen Ausdrucke wie bei glatten Armaturen.[1])

Um schliesslich ohne lange Überlegung den Selbstinduktionskoeffizienten einer Maschine auszurechnen, mag mit Vorteil die Tabelle auf S. 215 zu Hilfe gezogen werden.

Es ist nun allerdings zu bemerken, dass der Selbstinduktionskoeffizient, berechnet aus Gleichung (127) und (128), stets zu gross ausfällt, da die Kraftlinien Φ_1 die ganze Armatur umgeben und eine Änderung in der Grösse sofort einer Gegeninduktion ruft. Um diesem Umstande einigermassen Rechnung zu tragen, nehmen wir diesen Koeffizienten nur ungefähr halb so gross an.[2])

Der resultierende Selbstinduktionskoeffizient ist also

$$(129) \qquad L = \left(\frac{N}{N_2}\right)^2 . l . 10^{-8} . \frac{p}{p_1}\left(\frac{D K_1}{p \delta_1} + K_2 + K_3 + \ldots\right),$$

worin den Koeffizienten K_1, K_2 u. s. w., welche in der nachstehenden Tabelle enthalten sind, folgende Bedeutung beikommt:

K_1 für die Streuung nach den Polen,
K_2 „ „ „ am Umfange der Wicklung oder der Zacken,
K_3 „ „ „ im Innern der Zacken,
K_4 „ „ „ zwischen den Zackenspitzen (bei halbgeschlossenen Zacken).

[1]) Bei Ringarmaturen tritt ferner noch eine Streuung im Innern der Armatur auf und zwar lassen sich zwei Streufelder unterscheiden:
a) Streuung innerhalb der Spule,
b) Streuung nach der Welle.
Die Rechnung bleibt im übrigen die gleiche wie für die Aussenflächen.

[2]) Diese Verringerung ist übrigens nicht so willkürlich, wie sie vielleicht scheinen möchte. Sie ergiebt sich aus der Analogie mit Transformatoren und Drehstrommotoren, deren sekundäre Wicklung kurz geschlossen ist.

Bedeutet
L_1 den Selbstinduktionskoeffizienten der primären Spule (in unserem Falle gleich demjenigen einer einzelnen Spule),
L_2 die Selbstinduktion des sekundären Stromkreises ($L_2 = N_2{}^2 L_1$),
R_1 u. R_2 die Widerstände ($R_2 = N_2 R_1$) und
$\nu_1\ \nu_2$ die Hopkinson'schen Streuungskoeffizienten,
so ist der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient

$$L = L_1\left(1 - \frac{1}{\left(\left(\frac{R_1}{N_2}\frac{T}{L_1}\right)^2 + 1\right)\nu_1\,\nu_2}\right).$$

Die Streuung ist im allgemeinen ziemlich gross und zwar bedeutend grösser als bei Drehstrommotoren. Nehmen wir daher $\nu_1 = \nu_2 = 1{,}4$ und vernachlässigen wir $\left(\frac{R_1}{N_2}\frac{T}{L_1}\right)^2$ gegenüber der Einheit, so wird

$$L = L_1\left(1 - \frac{1}{1{,}4^2}\right) = 0{,}5\ L_1.$$

Tabelle der Selbstinduktionskoeffizienten einer einzelnen Armaturspule.

A. Glatte Armaturen.

	K_1	K_2
Grammering		
$N_1 = N_2$	0,25	0,2
Trommel		
$N_1 = N_2$ (Wicklung in zwei Lagen)	0,25	0,2
$N_1 = 2N_2$ (Wicklung in einer Lage)	0,25	0,1

B. Zackenarmaturen.

	K_1	K_2 für $\frac{x_1}{x_2}$ =			K_3 für $\frac{y}{x_3}$ =			
		0,8	1	1,2	4	3	2,5	2
Grammering								
$N_1 = \frac{1}{2} N_2$	1	2,56	2,35	2,08	6,72	5	4,2	3,36
$N_1 = N_2$	0,25	0,64	0,57	0,52	1,68	1,26	1,05	0,84
$N_1 = 2N_2$	0,25	0,32	0,29	0,26	0,84	0,63	0,52	0,42
Trommel								
$N_1 = N_2$	0,25	0,64	0,57	0,52	1,68	1,26	1,05	0,84
$N_1 = 2N_2$	0,25	0,32	0,29	0,26	0,84	0,63	0,52	0,42

C. Halbgeschlossene Zacken.

	K_1	K_2 für $\frac{x_1}{x_2}$ =			K_3 für $\frac{y}{x_3}$ =			K_4 für $\frac{a}{x_1}$ =			
		0,1	0,2	0,3	2,5	2	1,5	0,2	0,4	0,6	0,8
Grammering											
$N_1 = \frac{1}{2} N_2$ . . .	1	5,6	4,4	4	4,2	3,36	2,52	1	2	3	4
$N_1 = N_2$ . . .	0,25	1,4	1,1	1	1,05	0,84	0,63	0,25	0,5	0,75	1
$N_1 = 2N_2$ . . .	0,25	0,7	0,55	0,5	0,52	0,42	0,32	0,13	0,25	0,38	0,5
Trommel											
$N_1 = N_2$ . . .	0,25	1,4	1,1	1	1,05	0,84	0,63	0,25	0,5	0,75	1
$N_1 = 2N_2$ . . .	0,25	0,7	0,55	0,5	0,52	0,42	0,32	0,13	0,25	0,38	0,5

[redacted]

Beispiel. Die Daten einer 4poligen Maschine nach Fig. 161 und 162 mit 4 Bürsten seien wie folgt:

Totale Zahl Drähte . . . . $N = 256$
Anzahl Zacken. . . . . .
$=$ Anzahl Kommutatorlamellen $N_1 = N_2 = 64$
$D = 42$ cm, $l = 23$ cm, $\delta_1 = 15$, $\delta'_1 = 7$.

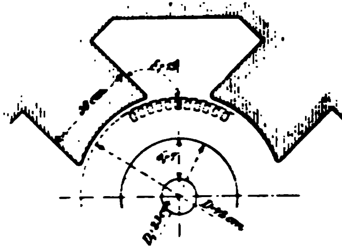


Fig. 161.

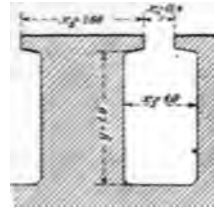


Fig. 162.

Bestimmung der Selbstindukionskoeffizienten.

a) Nach den Polen hin:

$k = 0{,}25$

$$L_1 = \frac{D}{p\,.\,\delta_1} k_1 \left(\frac{N}{N_2}\right)^2 l\,.\,10^{-8}\,.\,\frac{p}{p_1} = \frac{42}{2\,.\,15}\,.\,0{,}25\left(\frac{256}{64}\right)^2.\,23\,.\,10^{-8}\,\frac{2}{2}$$

$= 0{,}35\,.\,3{,}68\,.\,10^{-6}$. . . . . $= 1{,}3\,.\,10^{-6}$

b) An den Aussenflächen der Zacken:

$\frac{x_1}{y_2} = \frac{0{,}4}{1{,}66} = 0{,}24;\quad k_2 = 1{,}1$

$L_2 = k_2\left(\frac{N}{N_2}\right)^2 l\,.\,10^{-8}\,\frac{p}{p_1} = 1{,}1\,.\,3{,}68\,.\,10^{-6}$ . . . . $= 4{,}0\,.\,10^{-6}$

c) Im Innern der Zacken:

$\frac{y}{x_3} = \frac{1{,}9}{1} = 1{,}9;\quad k_3 = 0{,}84$ approx.

$L_3 = 0{,}84\,.\,3{,}68\,.\,10^{-6}$ . . . . $= 3{,}1\,.\,10^{-6}$

d) An den Zackenspitzen:

$\frac{a}{x_1} = \frac{0{,}2}{0{,}4}\quad k_4 = 0{,}62$

$L_4 = 0{,}64\,.\,3{,}68\,.\,10^{-6}$ . . . . $= 2{,}4\,.\,10^{-6}$

e) Im Innern der Armatur, von Spule zu Spule:

$k'_2 = 0{,}2$

$L_5 = 0{,}2\,.\,3{,}68\,.\,10^{-6}$ . . . . $= 0{,}7\,.\,10^{-6}$

f) Im Innern der Armatur, nach der Welle:

$k'_1 = 0{,}25$

$L_6 = \frac{23}{2\,.\,7}\,.\,0{,}25\,.\,3{,}68\,.\,10^{-6}$ . . . . $= 1{,}5\,.\,10^{-6}$

Total 13,0

Berechnung von $\frac{r_3 \cdot T}{L}$.

Führen wir die einzelnen Werte von r_3, T und L in $\frac{r_3 T}{L}$ ein und multiplizieren wir Zähler und Nenner mit $\frac{D\pi . \beta B_l}{2p}$ so ergiebt sich, indem wir die Glieder entsprechend ordnen

$$(130) \qquad \frac{r_3 T}{L} = \vartheta_1 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_1} \cdot \frac{p_1}{p} \frac{\beta \varepsilon B_l}{\left(\frac{D K_1}{p . \delta_1} + K_2 + \ldots\right)}$$

k = Anzahl Amp. Windg. pro cm Armatur Umfang.
Bezüglich γ und γ_1 siehe die auf S. 210 gemachte Bemerkung.

Berechnung von $\vartheta = \frac{r . T}{L}$.

Nach Voraussetzung ist: $\vartheta = \frac{1}{\alpha} \vartheta_1$, da jedoch α nicht zum Voraus bekannt ist, so führen wir eine ähnliche Rechnung durch wie bei der Bestimmung von ϑ_1. Es empfiehlt sich hier, die Bürstenfläche als Funktion der Stromstärke auszudrücken. Schreiben wir daher

$$\gamma . l_1 = s . \frac{J}{p_1}$$

wo s die Anzahl cm² pro Amp. bedeutet, so wird

$$(131) \qquad \vartheta = \frac{rT}{L} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_1} \frac{\varrho \beta B_l}{4 s p E} \cdot \frac{N_2}{\left(\frac{D K_1}{p \delta_1} + K_2 + K_3 \ldots\right)} .$$

Wert von E_2.

Eine genaue Bestimmung von E_2 ist, wenn auch nicht unmöglich, doch äusserst umständlich, um daher die Rechnung nicht allzusehr zu komplizieren, sind wir genötigt, gewisse Vereinfachungen einzuführen, welche allerdings unter ungünstigen Verhältnissen das Resultat etwas beeinflussen können. Es mag daher gleich von Anfang an gesagt sein, dass die nachstehenden Formeln nur in solchen Fällen noch einigermassen zuverlässige Zahlen ergeben, wo das Verhältnis $\frac{c}{\delta} > 4$ ist (siehe Fig. 163). Ferner darf die Zahl der Kommutatorsegmente nicht kleiner als ca. 35—40 sein. Die letztere Bedingung ist insofern von Einfluss, als wir der Einfachheit halber die Wicklung einer einzelnen Spule in einem einzigen Punkte befindlich denken.

Betrachten wir in Fig. 163 einen bestimmten Punkt G im Abstande a von der neutralen Zone, so steht derselbe, wie ersichtlich, unter dem Einflusse beider Pole. Die Kraftliniendichte unter den Polen sei B_l, so treten an diesem Punkte

$$B_l \cdot \frac{\delta}{\xi(c-a)+\delta}$$

Linien ein und

$$B_l \cdot \frac{\delta}{\xi(c+a)+\delta}$$

Kraftlinien aus.

Fig. 163.

Die resultierende Kraftlinienintensität B ist daher angenähert durch die Gleichung gegeben:

(132) $$B = B_l \delta \left(\frac{1}{\xi(c-a)+\delta} - \frac{1}{\xi(c+a)+\delta} \right).$$

Oder wenn wir δ gegenüber $\xi . c$ vernachlässigen, was in den meisten Fällen angehen mag, so ergiebt sich hieraus die Spannung

$$E_t = \frac{l\,D\,\pi\,n\,B_l}{60.10^8} \cdot \frac{\delta}{N_2\,\xi} \left(\frac{1}{c-a} - \frac{1}{c+a} \right).$$

Multiplizieren wir noch Zähler und Nenner mit $\frac{\beta}{2p_1}$, so ist

(133) $$E_t = \frac{lD\pi\beta B_l N n}{60.10^8.2p_1} \cdot \frac{2p_1\,\delta}{\beta N_2\,\xi} \left(\frac{1}{c-a} - \frac{1}{c+a} \right)$$

$$= E \cdot \frac{2p_1\,\delta}{\beta N_2\,\xi} \left(\frac{1}{c-a} - \frac{1}{c+a} \right).$$

D. Prüfung der Konstruktionsdaten.

Wir haben in dem Vorstehenden in grossen Zügen die Vorgänge geschildert, welche sich bei der Kommutation abspielen. Es handelt sich nun darum, aus den gegebenen Gleichungen die für die Konstruktion notwendigen Regeln abzuleiten. Wir machen hier gleich die Be

merkung, dass es unter keinen Umständen möglich ist, alle diese Bedingungen unter eine einzelne Formel zu bringen. Die Prüfung einer Maschine kann also erst als vollständig betrachtet werden, wenn dieselbe folgende Untersuchungen umfasst:

1) Bestimmung der Bürstenverschiebung a, bezw. des Verhältnisses $\frac{a}{c}$, (dasselbe darf einen bestimmten, auf Erfahrung gestützten Wert nicht überschreiten).

2) Berechnung des Ausdruckes $\frac{r \cdot T}{L}$. Derselbe sollte theoretisch > 1 sein, praktisch genügt es, wenn diese Grösse nicht allzu sehr unter 1 liegt.

3) Untersuchung der Variation, welcher die Grösse E_2 für die ermittelte Bürstenverschiebung unterliegt.

Diese Rechnungen sind allerdings ziemlich umständlich, doch kommt die hierfür aufgewandte Zeit wohl kaum in Betracht, gegenüber dem Zeit- und Geldverlust, welcher entsteht, wenn eine schlecht funktionierende Maschine umgeändert werden soll.

1. Bürstenverschiebung.

Bedeutet a die mittlere Bürstenverschiebung, E_m die in dieser Stelle erzeugte mittlere Gegen-E.M.K. und E die Klemmenspannung, so ist für nicht zu grosse Bürstenverschiebung nach Gleichung (119 und 133)

$$E_m = \frac{E \cdot 2 p_1 \delta}{\beta \xi N_2} \left(\frac{1}{c-a} - \frac{1}{c+a} \right) = \frac{J}{p_1} \cdot \frac{L}{T}. \tag{134}$$

Dividieren wir beide Seiten durch $\frac{J}{p_1} \cdot \frac{L}{T}$ und setzen wir

$$\frac{2 E \cdot p_1^2 \cdot \delta \cdot T}{\beta \cdot \xi \cdot N_2 \cdot J \cdot L} = u. \tag{135}$$

so ergiebt sich hieraus die Bürstenverschiebung

$$a = -u + \sqrt{u^2 + c^2}$$

oder

$$\frac{a}{c} = -\frac{u}{c} + \sqrt{\left(\frac{u}{c}\right)^2 + 1}. \tag{136}$$

Die nachstehende Tabelle giebt die Werte von $\frac{u}{c}$ für verschiedene Werte von $\frac{a}{c}$.

Tabelle der Werte von $\frac{a}{c}$, $\frac{u}{c}$, M und Q.

$\frac{a}{c}$	$\frac{u}{c}$	M	Q
0,05	9,97	1,01	20
0,075	6,62	1,02	13,5
0,100	4,95	1,03	10,2
0,125	3,93	1,05	8,25
0,150	3,26	1,06	6,9
0,175	2,77	1,10	6,1
0,200	2,40	1,13	5,42
0,225	2,11	1,17	4,94
0,250	1,87	1,20	4,49
0,275	1,68	1,26	4,24
0,30	1,51	1,31	3,81
0,35	1,25	1,45	3,63
0,40	1,05	1,65	3,46
0,45	0,89	1,88	3,36
0,50	0,75	2,23	3,35
0,55	0,636	2,65	3,37
0,60	0,534	3,32	3,54
0,65	0,446	4,22	3,76
0,675	0,404	4,91	3,97
0,70	0,364	5,73	4,16
0,725	0,328	6,75	4,44
0,75	0,294	8,00	4,70
0,775	0,258	10,00	5,16
0,80	0,225	12,6	5,66
0,82	0,200	15,6	6,24
0,84	0,175	19,7	6,90
0,86	0,151	25,7	7,80
0,88	0,128	34,7	8,9
0,89	0,117	41	9,6
0,90	0,106	50	10,6
0,91	0,095	61,8	11,7
0,92	0,084	78	13,1
0,93	0,072	102,5	14,8
0,94	0,062	142	17,6
0,95	0,051	202	22,5
0,96	0,041	314	25,7
0,97	0,030	556	33,4

Anmerkung. Die Gleichung (39) setzt, wie früher schon bemerkt wurde, voraus, dass $\frac{L}{T} < r$ sei. Trifft dies nicht zu, so bedeutet $\frac{a}{c}$ nichts anderes als eine Verhältniszahl.

Wie immer auch die Verhältnisse liegen, so können wir als erste Konstrucktionsregel aufstellen:

$\frac{a}{c}$ sollte möglichst klein sein, daraus folgt, dass $\frac{u}{c}$ möglichst gross sein sollte.

Die Untersuchung einer grösseren Zahl von Maschinen zeigt, dass $\frac{a}{c}$ für gute Maschinen im Maximum gleich 0,5—0,6 angenommen werden darf, was einem minimalen Wert von $\frac{u}{c} = 0{,}75$—$0{,}53$ entspricht.

Dividieren wir Gleichung (135) durch $c = \frac{D\pi}{4p}\left(1 - \beta\right)$ und multiplizieren wir Zähler und Nenner mit r_3, so folgt als zweite Konstruktionsregel.

$$\frac{u}{c} = \frac{0{,}64\,\delta\, p}{\xi\,\varepsilon\, D(1-\beta)\beta} \cdot \vartheta_1 => 0{,}53. \tag{137}$$

Wir machen hier eine interessante Beobachtung: Weder in Gleichung (130) noch (137) ist die Grösse N_2 enthalten.

Die Anzahl Kommutatorlamellen ist daher ohne Einfluss auf die mittlere Bürstenverschiebung. Daraus darf aber keineswegs der Schluss gezogen werden, dass dieselbe überhaupt ohne Einfluss auf die Kommutation sei. Nach früherem muss nämlich theoretisch $\vartheta > 1$ sein. Praktisch genügt es, dass ϑ nicht gar zu sehr unter „1" liege. Daraus folgt als dritte wichtige Konstruktionsregel; indem wir ϑ aus Gleichung (131) einsetzen

$$\vartheta = \frac{r \,.\, T}{L} = \frac{\gamma}{\gamma_1} \cdot \frac{1}{k} \frac{\varrho\,\beta\, B_l\, N_2}{4\, s\, p\, E} \cdot \frac{1}{\left(\frac{D\, K_1}{p \,.\, \delta_1} + K_2 + \ldots\right)} > 1 \tag{138}$$

oder mindestens möglichst wenig unter 1 sein. In dieser Gleichung erkennt man deutlich die Abhängigkeit der Lamellenzahl von der Klemmenspannung, Polzahl, Kraftliniendichte und Stromdichte am Armaturumfang.

2. Gestalt der Kurzschlusskurve.

Die Gleichungen (137) und (138) erlauben im allgemeinen schon ein ziemlich sicheres Urteil über die Wirkungsweise einer Maschine zu

fällen. Nichtsdestoweniger kann es ausnahmsweise vorkommen, dass alledem eine Maschine Funkenbildung zeigt. Der Grund hierfür ist (zu suchen, dass die Spannungskurve E_T für die berechnete mittlere Bür verschiebung nicht rasch genug oder zu stark ansteigt. Ist abe beispielsweise kleiner als $\frac{J}{p}\left(\frac{\alpha r}{2}+\frac{L}{T}\right)$ (nach Gleichung 117), so auch die Stromdichte am Ende der Kommutation grösser als vor Kurzschlusse aus. Damit dies nicht zutrifft, muss nach den Gleichu (134, 117 und 118)

$$T \cdot \frac{dE_m}{dt} = \frac{4 E p_1 \delta \gamma}{\beta \xi N_2 c^2} \frac{1+\frac{a^2}{c^2}}{\left(1-\frac{a^2}{c^2}\right)^2} = E_T - E_0 \text{ d. h.} = \frac{J}{p_1} r_3$$

sein, oder zum mindesten nicht weit darunter liegen.

Nimmt die Spannung etwas rascher zu, so hat dies nicht zu sagen, im Gegenteil: die Stromdichte i_1 nimmt dadurch gegen Ende der Kommutation ab. Anderseits darf sie aber auch ı gar zu stark anwachsen, da sonst der Strom J_1 während der Kom tation umgekehrt wird, wodurch i_1 wieder zunimmt. Wir werden Schlusse sehen, welche zulässige Grenzen hierfür angenommen we können.

Diese Gleichung lässt sich noch bedeutend vereinfachen, in wir für r_3 den Wert aus Gleichung (120) substituieren. Der Einfacl halber setzen wir ferner

$$\frac{1+\frac{a^2}{c^2}}{\left(1-\frac{a^2}{c^2}\right)^2} = M,$$

wofür die Tabelle auf S. 220 benutzt werden kann, so folgt:

$$(139) \qquad \frac{\delta \gamma M}{\xi \varepsilon \beta c^2} = \frac{1{,}6\, \delta \gamma p^2}{\xi \varepsilon D^2 (1-\beta)^2 \beta} \cdot M = > 1$$

oder nicht viel darunter.

Aus einer Vergleichung dieser Formel mit Formel (137) folgt aber,

$$(140) \qquad \left(\frac{u}{c}\right) \frac{2\gamma}{c \vartheta_1} M \text{ angenähert} = 1$$

oder

$$(141) \qquad \frac{Q\gamma}{c \vartheta_1} = \text{angenähert} = 1$$

sein muss. Q findet sich ebenfalls in der Tabelle auf S. 220 vor

Wie bereits hervorgehoben wurde, stellt die aus Gleichung (136) herausgerechnete Grösse a nur dann die Bürstenverschiebung dar, wenn $\vartheta > 1$ ist, in allen übrigen Fällen bedeutet sie eine blosse Verhältniszahl, welche aber nichts destoweniger für die Beurteilung einer Maschine von Wichtigkeit ist. Die wirkliche Bürstenverschiebung ist unter solchen Umständen bedeutend kleiner und entzieht sich einer genauen Berechnung. Immerhin lässt sich soviel sagen, dass die Bürstenverschiebung umso kleiner ausfällt, je grösser der Quotient $\frac{Q\gamma}{c\vartheta_1}$ der Gleichung (141) ist.

Wir haben übrigens in Gleichung (115) ein vorzügliches Mittel, die Gestalt der Stromkurve zu kontrollieren. Damit die Stromänderung sich möglichst den Gesetzen einer Geraden nähert, muss $i_2\gamma . l_1$ ungefähr gleich $\frac{J}{p_1}$ sein. Mit anderen Worten, das Verhältnis

$$\frac{i_2\gamma l_1}{\frac{J}{p_1}} = \frac{\left(\frac{\alpha}{2}+1\right)\vartheta + \vartheta\,\frac{E_0}{r}\,\frac{p_1}{J}}{\vartheta + 1}$$

sollte sich möglichst der Einheit nähern.

In dieser Gleichung ist allerdings E_0 nicht genau bekannt. Es wäre nun nicht zulässig, E_0 aus Gleichung (118) einzusetzen, da, wie gesagt, für $\vartheta < 1$ die Bürstenverschiebung nach der Rechnung zu gross wird. Weil es sich hier nur um Verhältniszahlen handelt, setzen wir für E_0 den Wert von E_T aus Gleichung (116) ein.

Wir erhalten dadurch ziemlich gute Mittelwerte. Es würde also:

$$(142 \qquad \frac{i_2\gamma l_1}{\frac{J}{p_1}} = \frac{\alpha + 2}{1 + \frac{1}{\vartheta}} = \frac{\alpha + 2}{1 + \frac{\alpha}{\vartheta_1}}.$$

Wobei berücksichtigt werden soll, dass dieses Verhältnis für $\vartheta > 1$ etwas zu gross, für $\vartheta < 1$ etwas zu klein ausfällt.

Zum Schlusse mögen hier eine Anzahl ausgeführter und probierter Maschinen folgen, und zwar sind dieselben nach ihrem Verhalten bezüglich der Funkenbildung geordnet, wobei selbstverständlich die unter gleicher Rubrik zusammengefassten Maschinen als angenähert gleichwertig zu betrachten sind.

Tabelle ausgefül

Nr.	Leistung				Type	Konstruktion							Ele
	KW	n	V	A		D	l	N	N_2	δ	p	p_1	L_1 ×10
1	5	1600	100	50	Nr. 12 *Rg* *M*	24,5	25	184	46	0,95	1	1	2,5
2	62,5	600	500	125	Nr. 28 *Tg* *M*	70	35	352	176	1,4	3	1	2,3
3	10	1200	100	100	Nr. 12 *Rg* *M*	29	30	150	50	1	1	1	4,2
4	196	300	530	370	Nr. 27 *TZ* *K*	115	55	488	244	1	2	2	1,1
5	10	285	500	20	Nr. 22 *Rg* *K*	35	25	1356	113	1,4	2	1	52,6
6	50	600	125	400	Nr. 26 *TZ* *M*	56	34	224	112	0,75	2	2	0,5
7	22	800	110	200	Nr. 18 aufr. *TZ* *K*	30	32	186	84	0,7	1	1	3,6
8	160	350	120	1340	Nr. 27 *TZ* *M*	116	37	216	108	0,6	3	3	0,8
9	20	800	1100	200	Nr. 12 *Rg* *M*	42	42	144	72	1,5	1	1	2,8
10	13,2	750	800	24	Nr. 12 *Rg* *M*	51	50	1120	140	1	1	1	51
11	250	85	140	1800	Nr. 27 *TZ* *M*	250	40	768	384	0,9	6	6	1,0
12	413	150	1 55	7500	Nr. 25 *Tg* *M*	237	43	432	216	2,45	12	12	0,9
13	220	230	550	142	Nr. 27 *Rg* *K*	150	54	768	256	2	5	1	15,2
14	242	330	184	1316	Nr. 27 *TZ* *M*	115	51	304	152	1,5	4	4	1,4
15	2,5	1300	125	20	Nr. 18 aufr. *TZ* *M*	18	16	400	50	0,35	1	1	9,2
16	4,5	1200	125	36	„ *TZ* *M*	18	22	352	44	0,4	1	1	11,4
17	40	700	125	320	Nr. 25 *TZ* *M*	41	32	122	61	0,6	2	1	1,0
18	15	450	500	30	Kastenform *RZ* *K*	40	30	708	118	0,2	2	1	17,9
19	30	800	125	2400	Nr. 25 *TZ* *M*	39,4	27	138	69	0,5	2	1	1,9
20	10	1000	125	80	Nr. 18 aufr. *TZ* *M*	24	27	216	54	0,4	1	1	4,9
21	48	500	120	400	Nr. 12 *TZ* *M*	51,5	40	120	60	0,3	1	1	2,4
22	60	500	120	500	„ *M*	62,2	40	140	70	0,6	1	1	2,4
23	9,9	1050	110	90	Nr. 27 *TZ* *M*	21,6	26	208	52	0,2	1	1	3,5

Anmerkung. Die unter Rubrik Type angeführten Nummern bez

Rg = Ringwicklung, glatte Armatur,
RZ = „ Zackenarmatur,
Tg = Trommelwicklung, glatte Arm

…chstrom-Dynamos.

Elektrische Daten							Charakteristik					
L_4 $\times 10^{-8}$	L	r_3	T	α	ϑ_1	ϑ	$\frac{u}{c}$	$\frac{a}{c}$	$\frac{Q\gamma}{c\,\vartheta_1}$	$\frac{\frac{i_2\gamma l}{J}}{p_1}$	$\frac{c}{\delta}$	
—	3,35	0,0061	0,001	0,92	2,92	3,2	5,45	**0,09**	0,6	2,22	5,05	Ausgezeichnete Maschinen
—	2,77	0,00145	0,00057	0,47	0,3	0,641	1,72	**0,27**	2,6	0,96	3,54	
—	4,8	0,0032	0,00118	1,07	0,79	0,74	1,1	**0,38**	0,7	1,3	6,35	
—	5,13	0,00188	0,00234	0,17	0,85	5,0	1,0	**0,41**	0,85	1,8	11,7	
—	59,8	0,058	0,0025	2,3	2,43	1,05	0,425	0,66	0,24	2,2	4,75	Motor
—	2,98	0,00094	0,00184	{0,53 [1] {0,073 [2]	0,58	1,1 8	0,95	**0,42**	{0,84 {1,05	1,32 1,84	11,1	Gute Maschinen
3,2	20,95	0,00348	0,0022	0,365	0,365	0,68	0,7	**0,52**	1,32	1,39	13,8	
—	2,265	0,00051	0,00158	0,685	0,354	0,516	0,55	**0,59**	1,1	0,91	15	
—	3,14	0,00117	0,00119	0,51	0,443	0,87	0,53	**0,6**	0,7	1,17	7,65	
—	57,4	0,0492	0,00048	11	0,41	0,037	0,545	**0,6**	1,07	0,4	6,4	
—	4,56	0,00048	0,00185	0,307	0,194	0,633	0,45	**0,65**	1,72	0,9	10,7	
—	1,12	0,0003	0,00224	1,1	0,6	0,546	8,1	0,07	**14,8**	1,1	2,29	Mittelmässige Maschinen
—	17,63	0,00375	0,00166	0,706	0,352	0,5	1,9	0,25	**3,5**	0,9	3,3	
—	3,65	0,00088	0,00141	1	0,34	0,34	2,16	0,22	**4,9**	1,76	3,6	
—	25,9	0,0265	0,001	3,26	1,02	0,312	0,4	**0,68**	0,455	1,25	19,7	
—	24,8	0,0152	0,00127	3	0,78	0,26	0,395	**0,68**	0,745	0,04	17,2	
—	4,13	0,001	0,0015	0,68	0,364	0,535	0,34	**0,71**	2,36	0,93	9,16	Motor
9,1	107,0	0,054	0,0017	2,16	0,86	0,4	0,32	**0,73**	0,875	1,19	3	
—	4,41	0,00075	0,00107	0,234	0,182	0,78	0,276	**0,76**	3,5	0,98	10,8	Schlechte Maschinen
—	13,66	0,0035	0,001	1,06	0,256	0,24	0,155	**0,87**	2,5	0,6	24	
—	4,21	0,00072	0,0016	0,51	0,274	0,538	0,048	**0,95**	18,7	0,87	25	
—	4,44	0,00055	0,00132	0,5	0,164	0,33	0,037	**0,96**	11,4	0,62	25	
—	12,95	0,00026	0,00088	0,59	0,177	0,3	0,115	**0,89**	**26,3**	0,6	11	

…h auf Tafel II

TZ = Trommelwicklung, Zackenarmatur,

M = Metallbürsten

K = Kohlenbürsten.

[1]) Metallbürsten.

[2]) Kohlenbürsten.

Aus dieser Tabelle geht zunächst deutlich hervor, dass das Verhältnis $\frac{a}{c}$ für sich allein keinen absolut sicheren Anhaltspunkt über den Gang einer Maschine giebt. Dieser Quotient kann unter Umständen, wie bei den Beispielen 12—14, sehr klein sein, und trotzdem laufen die Maschinen mittelmässig. Ist nämlich der Quotient $\frac{Q\gamma}{c\vartheta} >$ ca. 3,5, so fällt die funkenlose Zone sehr klein aus, und es muss die Bürsteneinstellung mit grosser Sorgfalt erfolgen.

Damit eine Maschine als wirklich gut betrachtet werden kann, sollte

$\frac{a}{c} <$ 0,5—0,6 im Maximum, wenn immer möglich, aber unter 0,5 bleiben, wobei

$\frac{Q\gamma}{c\vartheta_1}$ zwischen 0,6 im Minimum bis ca. 2,6 im Maximum variieren kann, ferner sollte:

$$\frac{i_2 \cdot \gamma\, l_1}{\frac{J}{p_1}} = > \text{ca. } 0{,}8$$

und

$\frac{c}{\vartheta} >$ ca. 4 sein.

Sind diese vier Bedingungen erfüllt, so lässt sich mit Bestimmtheit voraussagen, dass die Maschine tadellos funktionieren wird.

Wir haben zwar noch die weitere Bedingung, dass $\vartheta = \frac{\vartheta_1}{\alpha} > 1$ sein muss, doch ist diese Bedingung nicht allzustreng aufzufassen, aus Gründen, die wir weiter oben dargelegt haben.

Wir können ferner den Schluss ziehen, dass eine Maschine, bei welcher $\frac{a}{c} >$ ca. 0,75—0,8, oder $\frac{Q \cdot \gamma}{c\vartheta_1} >$ ca. 4—5 ist, mittelmässig laufen muss. Die ganze Rechnung reduziert sich mithin auf folgende einfache Operation:

Bestimmung von ϑ_1	aus Gleichung	(130)
$\vartheta = \frac{\vartheta_1}{\alpha}$	„ „	(131)
$\frac{u}{c}$	„ „	(137)
$\frac{Q\gamma}{c\vartheta_1}$	„ „	(141)
$\frac{\alpha + 2}{1 + \frac{\alpha}{\vartheta_1}}$	„ „	(142).

Es mag auch gut sein, sich bei dieser Gelegenheit zu ernern, dass wir schon bei der Bestimmung von L_1 einen mittleren reuungskoeffizienten eingesetzt haben, welcher mehr oder weniger r Wahrscheinlichkeit nahe liegt. Desgleichen wurde der Kontaktderstand ϱ überall $= 0{,}2$ für Kohle und $0{,}02$ für Metallbürsten annommen. Ein Vergleich mit der vorstehenden Tabelle hat daher nur lange Giltigkeit, als diesen Rechnungen die gleichen Voraussetzungen Grunde gelegt werden, was wohl zu berücksichtigen ist.

Wir wollen zum Schlusse noch kurz nachsehen, in welcher Weise sgeführte Maschinen, die ein unbefriedigendes Resultat geben, zu ändern sind, um die Funkenbildung zu vermindern d zwar soll angenommen werden, dass die Armatur unverändert beihalten werde, während eine neue Bewicklung der Magnete unter Umnden vorzusehen ist. Es soll jedoch gleich bemerkt werden, dass se Ratschläge nur für bereits ausgeführte Maschinen gelten, während n sich bei neuen Maschinen zweckmässigerweise an die oben angerten Regeln halten wird.

1. Fall. Es sei $\frac{a}{c} > 0{,}6$.

Gewöhnlich ist in solchen Fällen auch

$$\frac{Q\gamma}{c\,\vartheta_1}$$

leichung 141) viel zu gross.

Ein Blick auf die Gleichungen (137) und (141) belehrt uns, dass i solchen Abänderungen mit Vorsicht vorgegangen werden muss, um n gewünschten Erfolg zu erreichen. Wir können zwar als allgemeine egel aufstellen, dass ϑ_1 möglichst gross sein soll. Da in dem Ausucke für ϑ_1 die Grösse γ enthalten ist, so muss also γ vergrössert erden, dadurch nimmt aber indirekt Q ab. War der Luftabstand rsprünglich sehr klein, so empfiehlt es sich, unter allen Umständen ie Maschine mehr auszubohren und eventuell die Polschuhe etwas bzustanzen, damit das Verhältnis $\frac{c}{\vartheta}$ nicht unter 4 sinkt. Wir sehen war aus Gleichung (137), dass $\frac{u}{c}$ mit β abnimmt, wenigstens bis $= 0{,}5$ (darunter geht man ja nicht), doch wird dies dadurch ausglichen, dass ϑ_1 entsprechend zunimmt.

2. Fall. Die Maschinen Nr. 15, 16 und 18 zeigen das eigentümiche Verhalten, dass

$$\frac{a}{c} > 0{,}6,$$

dagegen

$$\frac{Q\gamma}{c\,\vartheta_1} < 1.$$

Hier wäre es durchaus von Schaden, den Polbogen zu verringern, was bei den angeführten Maschinen, beiläufig bemerkt, auch schon deshalb nicht angeht, weil sie keine Polschuhe besitzen. Die einzigen variablen Grössen sind daher δ und γ. Die Maschine muss also mehr ausgebohrt werden, ferner kann eine Verbesserung dadurch erzielt werden, dass man an jedem Bürstenstifte einzelne Bürsten um ca. 1 cm nach vorwärts schiebt.

3. Fall. Ist $\frac{a}{c} < 0{,}5$, dagegen $\frac{Q\gamma}{c\,\vartheta}$ sehr gross, so liegt der Fehler fast immer darin, dass der Polabstand zu klein und der Luftabstand ϑ zu gross ist. (Siehe Beispiel 12, 13 und 14.) Lässt sich die Ausbohrung nicht durch Blecheinlagen (bei aufgesetzten Polen) vermindern, so muss wenigstens c vergrössert werden. Auch kann es nichts schaden, γ zu verringern, obwohl der damit erzielte Erfolg sich mehr indirekt zeigt, dadurch, dass Q kleiner ausfällt.

E. Verhalten von Motoren.

Lässt man eine Maschine zuerst als Generator und hierauf als Motor bei gleichbleibender Kraftlinienzahl laufen, so wird man die Beobachtung machen, dass im zweiten Falle sowohl die Bürstenverschiebung als auch die Funkenbildung kleiner ausfällt. Diese Erscheinung ist auf das zeitliche Zurückbleiben des Magnetismus gegenüber der magnetisierenden Kraft zurückzuführen. Wird nämlich die Armatur nur langsam im Felde gedreht, so nimmt die Kraftliniendichte von N bis a (Fig. 164) zu und von hier wieder ab. Diese Regel stimmt aber, wie gesagt, nur solange die Armatur langsam dreht. Bei den gebräuchlichen Tourenzahlen dagegen entstehen im Eisen Foucaultströme, welche sich sowohl dem Anwachsen als der Abnahme der Kraftlinien entgegensetzen, und welche bewirken, dass die grösste Sättigung erst

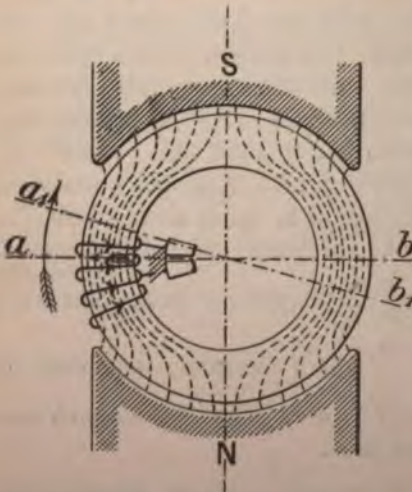


Fig. 164.

in der Stellung $a_1 b_1$ eintritt. Wir erhalten somit genau das gleiche Resultat, wie wenn die Bürsten schon in der neutralen Zone um das Stück $a a_1$ nach rückwärts verschoben wären. Die gesamte Bürstenverschiebung nach rückwärts wird also notwendigerweise vermindert, und es ist in den meisten Fällen möglich, die Bürsten für alle Belastungen in der neutralen Zone zu lassen.

Nach dem Gesagten empfiehlt es sich daher bei Motoren etwas grössere Sättigungen im Armatureisen anzunehmen, während bei Generatoren das umgekehrte vorzuziehen ist.

Wendet man die oben abgeleiteten Formeln für Motoren an, so sind die Werte von $\frac{u}{c}$ u. s. w. wie folgt zu modifizieren

$$\frac{u}{c} > 0{,}35, \qquad \frac{Q\gamma}{c\,\vartheta_1} > 0{,}2 \text{ und } < 1{,}5.$$

F. Spannungsabfall.

Bei den Beispielen, welche bisher über Magnetwicklungen vorgekommen sind, haben wir dem Spannungsabfall durch Armaturreaktion dadurch Rechnung getragen, dass wir ihn schätzungsweise angenommen und zum Ohm'schen Versuch geschlagen haben. Es ist jedoch hierbei genau darauf zu achten, dass die auf solche Weise bestimmte Kraftlinienzahl Φ nur zur Ausrechnung der aw benutzt werden darf, während für den Hysteresisverlust streng genommen nur die wirkliche Kraftlinienzahl, d. h. die Kraftlinienzahl, welche der Klemmenspannung + den verschiedenen direkten Spannungsverlusten entspricht, einzusetzen wäre. Eine zweite, zuerst von W. B. Esson (Journal of the Instit. of Electr. Eng. XIX u. XX 1890) angegebene Methode besteht darin, die Maschine so auszurechnen, wie wenn überhaupt keine Armaturreaktion vorhanden wäre, und zu den erhaltenen aw einen gewissen Prozentsatz (ca. 30 %) der aw der Armatur hinzuzuschlagen.

Diese Zahl muss als Mittelwert betrachtet werden. In vielen Fällen jedoch ergiebt sie sehr ungenaue Resultate, da augenscheinlich die Form der Magnete und die Sättigung eine wichtige Rolle spielen. Der Verfasser hat sich nun vergeblich bemüht, an Hand eines reichlichen Versuchsmaterials allgemein richtige Gesetze abzuleiten. Wenn auch in vielen Fällen die Übereinstimmung mit den Versuchsdaten eine ganz befriedigende war, so liess sich andererseits konstatieren, dass ganz gleiche, zu verschiedenen Zeitpunkten und mit geringen Wicklungsänderungen ausgeführte Maschinen ein vollständig verschiedenes Verhalten zeigten. Möglicherweise können diese Erscheinungen durch Gussblasen hervor-

gerufen sein, ein anderer plausibler Grund lässt sich wohl kaum dafür angeben. Unter allen Umständen jedoch soll man sich davor hüten, gelegentlich in Zeitschriften auftauchende und durch ihre Einfachheit bestechende Formeln ohne die nötige Vorsicht anzuwenden. Die Ursachen, welche einen Spannungsabfall bewirken können, sind so komplizierter Natur, dass sie unmöglich durch einfache Formeln dargestellt werden können.

Die nachstehenden Formeln haben daher mehr den Zweck, dem Anfänger den Weg anzudeuten, welcher bei solcher Berechnung allfällig zu verfolgen ist, denn für gewöhnlich fehlt es dem Ingenieur an der nötigen Zeit, solche Berechnungen bis in alle Details anzustellen, und er wird sich lieber mit einer etwas kleineren Genauigkeit begnügen und dafür seine Maschine reichlich dimensionieren. Übrigens haben diese Rechnungen nur einen Zweck, wenn sie äusserst genau ausgeführt werden, da die kleinsten Verluste von Bedeutung sind. Vor allem müssen daher die Magnetisierungskurve, Streuungskoeffizienten und Bürstenwiderstand genau bekannt sein.

Der Spannungsverlust setzt sich zusammen aus dem
direkten Spannungsabfall und dem
indirekten Spannungsabfall durch Entmagnetisierung.

1. Direkter Spannungsabfall.

a) Ohm'scher Verluste (e) ergiebt sich aus der Gleichung (28)

$$e = \frac{J}{2 p_1} \cdot R$$

b) Verlust an den Bürsten (e_1)

(143) $$e_1 = \frac{2 \varrho}{\gamma l_1} \cdot \frac{J}{p_1} \cdot$$

Bei einer grösseren Zahl ausgeführter Maschinen ergab sich als mittlerer Wert

$$e_1 = 0{,}5\, e.$$

c) Spannungsverminderung durch Verschiebung der Bürsten (e_2)

$$e_2 = 2 \cdot \frac{B_l l v}{10^8} \cdot \frac{p}{p_1} \cdot \frac{N}{D \pi} \int\limits_{x=0}^{x=a} \left(\frac{\delta}{\xi (c - x) + \delta} - \frac{\delta}{\xi (c + x) + \delta} \right) dx$$

$$= \frac{B_l l v N}{10^8 p_1} \cdot \frac{4{,}6 p \delta}{D \pi \xi} \log_{10} \frac{1}{1 - \left(\frac{a}{\xi c + \delta} \right)^2}$$

[redacted]

oder indem wir Zähler und Nenner mit 2β multiplizieren

$$(144) \qquad c_2 = E \cdot \frac{4,6\,\delta}{b\,\xi} \log_{10} \frac{1}{1 - \left(\frac{a}{\xi c + \delta}\right)^2}.$$

Für E muss der Einfachheit halber die Klemmenspannung eingesetzt werden. Dieser Spannungsverlust ist gewöhnlich ziemlich gering und variiert zwischen 0,3 und 0,9 %. Im Mittel kann er zu 0,6 % angenommen worden.

2. Spannungsabfall durch Entmagnetisierung.

a) Infolge der Bürstenverschiebung.

Die Anzahl Ampèrewindungen, welche zur Kompensation benötigt werden, sind:

$$(145) \qquad (\Im m)_2 = \frac{J.N}{4pp_1} \cdot (1-\beta)\frac{a}{c}.$$

b) Durch ungleiche Sättigung der Magnete.

Es bedeutete $\nu . B_m$ die Kraftliniendichte zur Erzeugung der Spannung

$$E + e + e_1 + e_2$$

$B'_l = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{J.N}{4pp_1}\beta \cdot \frac{1}{2\delta}$ die von der Armaturreaktion herrührende Kraftliniendichte in der Luft

b den Polbogen, so ist angenähert, indem man der Richtung der Kraftlinien einigermassen Rücksicht trägt

$$(146) \qquad (\Im m)_3 = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{b}{2}\left[f(\nu B_m + 0,7\,B_l') + f(\nu B_m - 0,7\,B_l') - 2f(\nu B_m)\right].$$

Eine ähnliche Formel ist bereits in der zweiten Auflage dieses Buches enthalten.

Die Tabelle auf Seite 232 enthält eine Zusammenstellung der Versuchsdaten von 14 ausgeführten Maschinen. Über die Maschinen 8—14 liegen allerdings keine vollständigen Versuchsdaten vor. Nichtsdestoweniger lässt ein Blick auf die zwei letzten Kolonnen leicht erkennen, dass die zweipoligen Maschinen 8—11 mit vierkantigen Gusspolen einen grösseren Spannungsabfall als die Maschinen 1—4 mit runden Stahlgussmagneten und Polschuhen haben, was übrigens selbstverständlich erscheint.

Die Maschinen 5—7 sind ferner mit tiefen Schlitzen versehen, welche ursprünglich die Bestimmung hatten, die Armaturreaktion zu verringern. Die Erfahrung hat indessen dargethan, dass diese Schlitze absolut ohne Einfluss auf den Spannungsabfall sind. Wenn man sie trotzdem bei diesem Type beibehielt, so geschah dies nur mit Rück-

t die grössere Abkühlungsfläche der Magnete.

Tabelle ausgeführter Maschinen.

	Type	Leistung			Konstruktionsdaten				Ampère-Windungen								Verhältniszahlen		Spann
		KW	Touren	E	D	l	N	δ	aw_a	$(\mathfrak{J}m)$	$(\mathfrak{J}m)_1$	$(\mathfrak{J}m)_2$	$(\mathfrak{J}m)_3$	$(\mathfrak{J}m)_4$	$(\mathfrak{J}m)_4'$	Fehler	$\frac{(\mathfrak{J}m_4')-(\mathfrak{J}m)_1}{aw_a}$	$\frac{(\mathfrak{J}m_4')-(\mathfrak{J}m)}{aw_a}$	
1		2,5	1450	125	21	16	424	0,3	2120	4130	4890	350	(56 + 18 — 2 . 28) 11 = 200	5440	6150	−11,5%	0,60	0,95	8 Volt
2	Tafel II	5	1250	125	24	19	268	0,3	2680	5750	6500	390	(68 + 14 — 2 . 24) 13,5 = 460	7350	7100	+3,5%	0,22	0,50	2,4
3	Nr. 17	13	1000	125	28	24	196	0,4	5100	5450	6500	640	(66 + 7 — 2 . 18) 16,5 = 610	7750	7560	+2,5%	0,21	0,41	6,0
4		18	1020	125	30	26	150	0,5	5400	9400	12300	780	(72 + 12 — 2 . 23) 17 = 645	13725	13400	+2,4%	0,20	0,74	2,0
5	Tafel II	25	700	110	37	28	126	0,4	5660	8050	8600	820	(200 + 31 — 2 . 80) 10,5 = 750	10370	9500	+9,1%	0,16	0,26	5
6	Nr. 26 mitPolein-	50	600	125	56	34	224	0,75	5600	12500	13900	770	(170 + 34 — 2 . 71) 14 = 870	15540	16300	−4,7%	0,43	0,68	9
7	schnitten	65	550	125	60	36	192	0,6	6230	10900	11400	1090	(210 + 26 — 2 . 78) 15,5 = 1240	13730	13700	+0,2%	0,37	0,45	6,4
8	Tafel II	2,5	1300	125	18	16	400	0,4	2000	7650	—	—	—	—	9800	—	—	1,07	—
9	Nr. 18	4,5	1200	125	18	22	352	0,4	2270	7360	—	—	—	—	9800	—	—	1,07	—
10	aufrecht	7	1100	125	24	23	240	0,4	3360	9200	—	—	—	—	11200	—	—	0.6	—
11		10	1000	125	24	27	216	0,4	4300	7300	—	—	—	—	11600	—	—	1,0	—
12	Tafel II	15	950	125	31,6	21	170	0,4	2640	6900	—	—	—	—	8500	—	—	0,60	—
13	Nr. 25	30	800	125	39,4	27	138	0,4	4100	6550	—	—	—	—	8100	—	—	0,38	—
14		40	700	125	41	32	112	0,4	4900	9000	—	—	—	—	12600	—	—	0,73	—

$aw_a = \frac{JN}{4pp_1}$ = Ampère-Windungen der Armatur,

$\mathfrak{J}m$ = Ampère-Windungen bei Leerlauf,

$(\mathfrak{J}m)_1 = aw$ zur Erzeugung der Spannung $E + e + e_1 + e_2$.

$(\mathfrak{J}m)_2$ und $(\mathfrak{J}m)_3$ siehe Gleichungen (145) und (146).

$(\mathfrak{J}m)_4 = (\mathfrak{J}m)_1 + (\mathfrak{J}m)_2 + (\mathfrak{J}m)_3$,

$(\mathfrak{J}m)'_4$ nach Versuch.

Aus der Tabelle geht hervor, dass zur Überwindung der Armaturreaktion allein bei den Maschinen (1—4) ca. $^1/_4$ der *aw* der Armatur genügten, während bei den vierpoligen Maschinen mit massiven, vierkantigen Polen ungefähr $^1/_3$ notwendig sind.

G. Armaturwicklungen zur Verminderung der Armaturreaktion.

Wir haben schon in Kap. II B Seite 48—51 einige spezielle Magnetanordnungen angeführt, welche die Bestimmung haben, die Armaturreaktion zu vermindern und die Kommutation zu erleichtern. Dieser Zweck kann aber auch durch die Armaturwicklung selbst erreicht werden. Unter die bekanntesten Armaturwicklungen dieser Art gehören diejenigen von W. Sayers, (Engl. Pat. Nr. 16572 vom 29. Sept. 1891 und Nr. 10298 vom 24. Mai 1893). Die Eigentümlichkeit derselben besteht darin, dass zwischen die Kommutatorlamellen und die Verbindungsstellen an der Armaturwicklung noch je eine Windung eingeschaltet ist, welche gegenüber der zugehörigen Armaturspule um einen gewissen Betrag verschoben ist. Der besseren Übersicht halber sind in Fig. 165 die

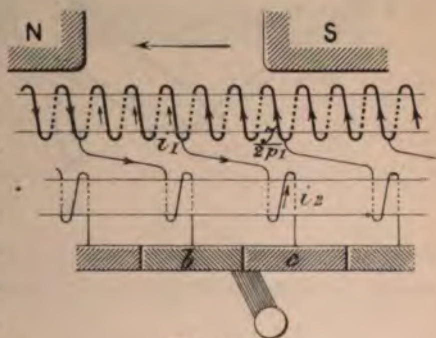


Fig. 165.

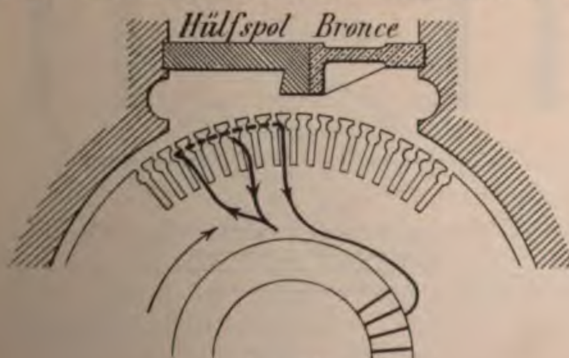


Fig. 166.

beiden Wicklungen unabhängig voneinander auf zwei Eisenkernen dargestellt. Wenn die Kompensationswicklung gleich viel Windungen wie die Hauptspule hat, so sollte die Verschiebung ungefähr gleich der

Bürstenverschiebung sein; für gewöhnlich besteht sie indessen nur aus einer einzigen Windung, die Verschiebung ist daher etwas grösser. Bei

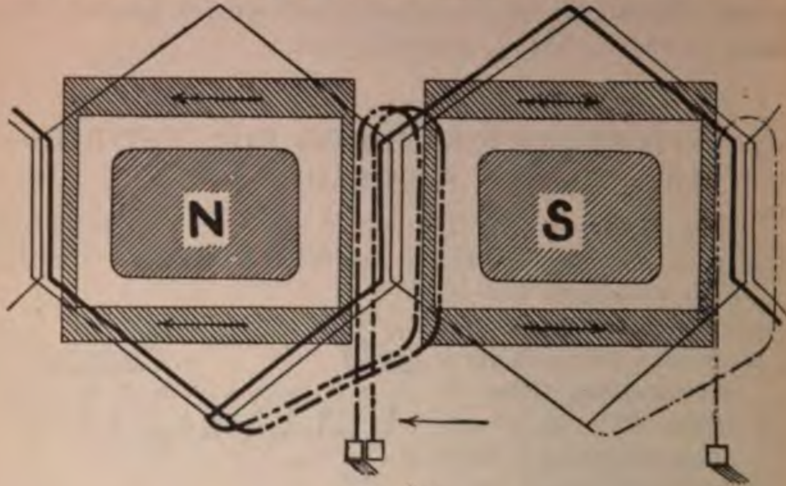


Fig. 167.

der Wicklung Fig. 165 geschieht die Verschiebung nach rückwärts wobei die Kompensationsspule umgekehrt gewickelt ist. Gerade hierin

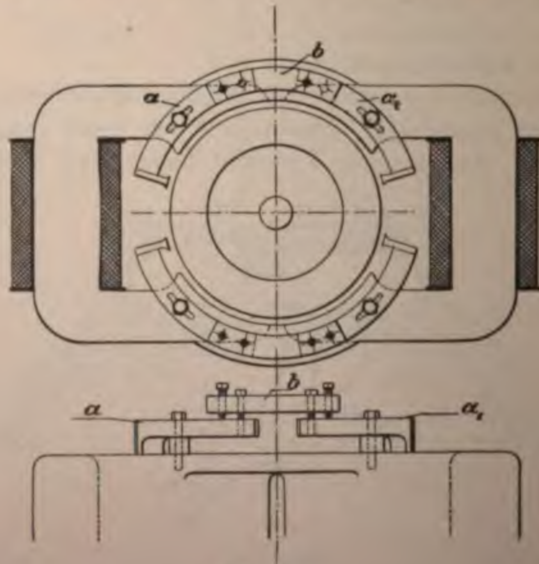


Fig. 168.

liegt der grosse Vorteil dieses Systems. Da nämlich die nach rückwärts befindliche Polecke durch die Quermagnetisierung verstärkt wird, so

[redacted]

ist es auf diese Weise möglich, eine fast konstante Bürstenstellung beizubehalten.

Sayers verwendet diese Armaturwicklung auch sehr häufig in Verbindung mit Hilfspolen, welche aus Fig. 166 ersichtlich sind.

Eine neuere sehr ingenieuse Anordnung von Sayers, Moores & Coulson für Trommelwicklungen mit fixer Bürstenstellung ist in Fig. 167 und 168 dargestellt (Engl. Pat. Nr. 27209, 30. Nov. 1896). Sie unterscheidet sich von derjenigen in Fig. 166 dadurch, dass hier das Kommutationsfeld der Hilfsmagnete durch die Armaturreaktion selbst geliefert wird, folglich genau im Verhältnis der Armaturstromstärke zunimmt. In Fig. 168 bedeuten a und a_1 die Hilfspole, welche untereinander durch ein regulierbares Mittelstück b verbunden sind. Bei der Sayer'schen Wicklung darf der Kompensationsspule ein kleiner Querschnitt als der Hauptwicklung gegeben werden, da die erstere nur während einen kleinen Bruchteil einer ganzen Umdrehung in den Stromkreis eingeschaltet bleibt.

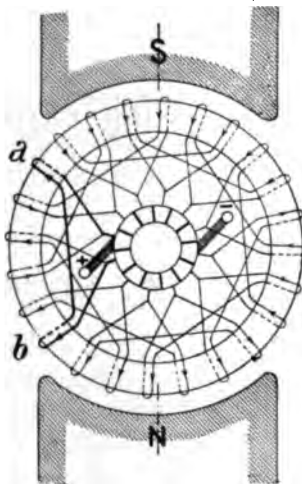


Fig. 169.

Von den übrigen Kompensationswicklungen dieser Art erwähnen wir noch diejenigen von Brown-Mordey Fig. 169, bei welcher je zwei gegeneinander verschobene Spulen zwischen zwei Kommutatorsegmenten eingeschaltet sind. Diese Wicklung ist insofern interessant, als die Stromrichtung in den Drähten zwischen a und b von Spule zu Spule wechselt, so dass keine entmagnetisierende Wirkung entstehen kann. Auch die Bürstenverschiebung wird bei dieser Anordnung kleiner ausfallen, dafür muss aber die Bürsteneinstellung offenbar mit um so grösserer Sorgfalt erfolgen, um Funkenbildung zu verhüten.

Eine sehr einfache Methode, die Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Armaturschule und damit die Bürstenverschiebung zu verringern, besteht schliesslich darin, die einzelnen Windungen einer Spule auf verschiedene Zacken zu verteilen. Der Verfasser hat diese Methode bereits in der 3. Aufl. dieses Buches (S. 272) angeführt und seit 1895 an seinen 2poligen Maschinen benutzt.

VII. Gleichstrommaschinen für spezielle Zwecke.

A. Bogenlichtmaschinen.

Die Benutzung von Bogenlichtmaschinen mit hintereinander geschalteten Bogenlampen hat auf dem Kontinente lange nicht diejenige Verbreitung gefunden wie in Amerika, trotz der ausgedehnten Anwendung, welche auch hier vom Bogenlichte gemacht wird. Der Grund hierfür mag teilweise in den strengeren Anforderungen zu suchen sein, welche in Europa sowohl an die Lichtverteilung als auch an die Betriebssicherheit elektrischer Anlagen gestellt werden, und denen das Parallelschaltungssystem naturgemäss besser entspricht. Auch steht ausser Frage, dass die frühzeitige Entwicklung des Wechselstroms in Europa nicht wenig dazu beigetragen hat die Serieschaltung zu verdrängen.

Wir werden daher im Nachstehenden auch nur die hauptsächlichsten Punkte dieser Beleuchtung berühren und im speziellen die bekanntesten amerikanischen Maschinen besprechen.

Wir beginnen zunächst mit den Maschinen für Einzellicht.

1. Maschinen für Einzellicht.

Diese Beleuchtungsart kommt sozusagen ausschliesslich nur bei Leuchttürmen vor. Eine eingehende Behandlung derselben findet sich in dem Rapporte von Prof. A. Blondel vor dem International Maritime Congress in London, Juli 1893. Wenn auch Blondel auf Grund langjähriger und eingehender Versuche zu einem für die Gleichstrommaschinen negativen Resultate gelangte, so ist es immerhin lehrreich, die Gründe kennen zu lernen, welche diesen Misserfolg veranlassten.

Nach der französischen Praxis sind je nach dem Wetter Stromstärken von 25—100 Amp. im Gebrauch. Die minimale Stromstärke

genügt z. B. bei heiterem Wetter (ca. 90 Tage im Jahre) um mittelst der sogenannten „feux éclairs“ einen wirksamen Lichteffekt auf ca. 136 km auszuüben, während bei nebligem Wetter das Licht von 100 Amp. nur noch auf ca. 46 km sichtbar ist. Um diese Variation bewerkstelligen zu können, hat es sich als zweckmässig erwiesen, 2 Dynamo-Maschinen von je 25—50 Amp. zu benutzen, die bei grösserem Strombedarf parallel geschaltet werden. Die Spannung variiert zwischen 45—50 Volt am Lichtbogen, muss jedoch an der Maschine mindestens 65—70 Volt betragen, je nachdem die Regulierung der Lampen von Hand oder automatisch erfolgt. Da beim Annähern der Kohlen der Widerstand des Lichtbogens abnimmt, sollte die Charakteristik der Maschine derart beschaffen sein, dass sich die Spannung mit abnehmendem äusserem Widerstand, bezw. zunehmender Stromstärke verringert. Eine 2. Anforderung ist durch die Eigentümlichkeit des Geschwindigkeitsregulators gestellt. Es muss nämlich die Dynamo innerhalb einer Länge ihrer Charakteristik betrieben werden, für welche einer Zunahme des Stromes eine Vergrösserung der Wattleistung entspricht, oder mindestens keine Abnahme der Wattleistung eintritt, weil sonst in diesem Falle der Motor die Tendenz hat, beim Nähern der Kohlen schneller zu laufen, was ein fortwährendes Zucken des Lichtes zum Gefolge hat.

Auf Grund langjähriger Beobachtungen fanden die französischen Marineingenieure folgende günstigste Neigungen der Maschinen-Charakteristik.

Bei Regulierung von Hand

Stromstärke	Spannung am Lichtbogen	Neigung
45 Amp.	43 Volt	0,5 —0,6
65 „	45 „	
75 „	48 „	0,45—0,55
95 „	50 „	0,35—0,45.

Für die automatische Regulierung würden nach Blondel folgende Werte anzunehmen sein:

Stromstärke	Spannung am Lichtbogen	Neigung
25 Amp.	45 Volt	0,8
50 „	47 „	0,35
100 „	50 „	0,15.

Bei Anwendung einer Nebenschlussmaschine hält es nicht schwer, diesen Anforderungen zu genügen, der einzige Vorwurf, welcher sich gegen diese Maschine richtet, ist ihre geringe Stabilität. Um die nötige Neigung der Charakteristik zu erreichen, ist man nämlich genötigt, jenen Teil der Charakteristik zu verwerten, welcher in der Nähe imalen Leistung liegt. Die geringste Überlastung, wie dies

bei Berührung der Kohlenstifte unvermeidlich ist, hat daher die sofortige Entmagnetisierung der Maschine zur Folge.

Für Seriemaschinen nimmt die Spannungskurve anfänglich mit wachsendem Strome zu, erreicht dann ein Maximum und fällt nachträglich wieder ab. Die Seriemaschine ist also nur für dieses letztere Stück der Charakteristik verwendbar. Da indessen der Spannungsabfall verhältnismässig viel kleiner als bei Nebenschlussmaschinen ist, muss die vorhandene Neigung noch künstlich durch einen Vorschaltwiderstand vergrössert werden. Der Nutzeffekt wird dadurch bedeutend verringert Die Hauptschwierigkeit liegt hier auch hauptsächlich in der grossen Stromstärke, welche beim Kurzschlusse entsteht, Umgekehrt wird beim Unterbruch des Stromkreises die Maschine stromlos und der Motor hat die Tendenz „durchzubrennen".

Versuche mit Kompoundmaschinen führten hauptsächlich wegen der zu grossen Kurzschlussstromstärke zu keinem brauchbaren Resultate. Die Folge davon war, dass man heute in Frankreich für diesen Zweck wieder allgemein zu den alten Wechselstrommaschinen mit permanenten Magneten von de Meritens zurückgekehrt ist, die sich ganz gut bewährt haben sollen. Als besonderer Vorteil des Wechselstromsystems ist auch zu nennen, dass sowohl die Lichtbogenspannung, als auch der Vorschaltwiderstand kleiner ausfällt. Zieht man die einzelnen Verluste in Betracht, so werden die Angaben von Blondel einigermassen begreiflich erscheinen, wonach bei Anwendung von Wechselstrommaschinen für die gleiche mechanische Leistung ein doppelter Lichteffekt erzielt werden konnte als mit Gleichstrommaschinen.

2. Maschinen für Serieschaltung von Bogenlampen.

Die Serienschaltung der Lampen hat den grossen Vorteil, dass die Spannung pro Lampe viel kleiner (42—47 Volt) sein kann, als dies bei Parallelschaltung erforderlich wäre. Es muss dies dem Umstande zugeschrieben werden, dass sich die Lampen gegenseitig regulieren. Die für Serienbetrieb dienlichen Bogenlampen regulieren auf konstante Lichtbogenspannung. Der Dynamomaschine fällt daher die Aufgabe zu, die Stromstärke konstant zu erhalten, welches auch die Zahl der momentan brennenden Lampen sei. Andererseits soll sich die Spannung jeweilig der Lampenzahl anpassen. Hierfür eignen sich also vorzugsweise Seriemaschinen, welche im abfallenden Teile ihrer Charakteristik betrieben werden. Es ist aber leicht einzusehen, dass eine gewöhnliche Seriemaschine mit Hinzuziehung eines Vorschaltwiderstandes diese Bedingung nur ungenügend erfüllt. Man ist daher genötigt, falls man sie trotzdem benutzen will, zu einer künstlichen Regulierung zu greifen, welche darin besteht, dass man die Bürsten verschiebt, oder die Magn

windungszahl ändert. Wie früher auseinander gesetzt wurde, könnte der gleiche Zweck auch mittelst eines variablen Widerstandes, der parallel zu der Magnetwicklung gelegt wird, erreicht werden, doch scheint hiervon keine Anwendung gemacht worden zu sein. Unter diese Maschinenkategorie gehören die Dynamos des Excelsior, Wood und Western, Standerd Co. etc.

Es hat augenscheinlich keinen Sinn, an den Nutzeffekt derartiger Maschinen einen allzustrengen Massstab anzulegen, denn solange die Erwärmung der Maschinen das erlaubte Mass nicht überschreitet, bleibt es sich selbstverständlich gleich, ob der Vorschaltwiderstand ausserhalb oder in die Maschine verlegt werde. Weitaus wichtiger ist dagegen die Frage der funkenlosen Kommutation, welche für jede Bürstenstellung gleich gut erfolgen soll. Dieselbe ist nur dann mit einiger Sicherheit zu erwarten, wenn die Armaturwicklung so disponiert wird, dass die Bürsten schon für den normalen Gang bis unter die Pole verschoben werden müssen, indem die Änderung in der Feldstärke für die verschiedenen Lagen von hier an am geringsten ist. Diese Bedingung setzt eine ziemlich grosse Selbstinduktion der einzelnen Armaturspulen voraus, weil sonst für ihre Lage direkt unter den Polen eine zu grosse Gegen-E.M.K. entstehen würde. Die Lamellenzahl steht also in engem Zusammenhange mit der Konstruktion und Bewicklung der Maschine und darf weder zu klein noch zu gross (!) gewählt werden. Je weiter die Bürsten gegen die Polaxe verschoben werden, um so fühlbarer wird der Einfluss der Armaturreaktion, der eine Schwächung des Feldes bewirkt. Die Dauer des Kurzschlusses müsste daher für solche Lagen abgekürzt werden. In der That wurden von verschiedenen Konstrukteuren Doppelbürsten angewandt, deren relative Lage automatisch mit der Verschiebung der Hauptbürsten reguliert wird. Es scheint übrigens, dass selbst bei sorgfältiger Abmessung der einzelnen Teile die Funkenbildung nie ganz unterdrückt werden kann, es handelt sich also in zweiter Linie darum, ihrer schädlichen Wirkung durch geeignete Kommutatorkonstruktion, grosse Isolation, auswechselbare Lamellen etc. zu parieren.

Die hohen Spannungen, mit welchen man es hier zu thun hat, erheischen eine ganz vorzügliche Isolation aller Teile, insbesondere des Kommutators. Am geeignetsten hat sich hierfür die zweipolige Ringmaschine erwiesen und zwar mit glatter Armatur, wobei einzelne Konstrukteure ganz bedeutende Luftlängen anwenden (δ bis zu 3 cm). Diese grossen Luftdistanzen haben insofern ihre Berechtigung, als dadurch ein ziemlich homogenes Feld auch über die Polspitzen hinaus erreicht wird. Natürlich muss dementsprechend die Kraftliniendichte in der Luft verringert werden. Auffallend erscheinen die hohen

Sättigungen im Armatureisen, die zwischen 17000—18000 L schwanken und bei einzelnen Brushmaschinen über 25000 (!) L betragen. Diese Sättigungen sind teils zur Verringerung der Fu bildung teils zur Erreichung des Spannungsabfalls notwendig, h aber das unangehme, dass der Hysteresisverlust und die Erwärn sehr gross werden.[1])

Bei einer 150-Lampenmaschine System Wood (7000 Volt !) w beispielsweise nach zehn stündigem Betriebe eine Erwärmung der Arn auf 95° C. konstatiert bei 27° C. Zimmertemperatur (S. Electr. Worl

Ausser den bisher besprochenen Maschinen mit gewöhnliche schlossener Armaturwicklung existiert eine beschränkte Zahl Maschinen, welche mit Rücksicht auf ihre Armaturwicklung als Masc mit offener Wicklung bezeichnet werden. Hierunter sind die Masc von Thomson-Houston, Brush und der Westinghouse C rechnen.

Die offenen Wicklungen sind dadurch charakterisiert, da keine geometrisch in sich geschlossene Figuren bilden. Dies bestehen ferner aus einer verhältnismässig geringen Zahl S die so mit dem Kommutator verbunden werden, dass jede Spul der Kommutation ausgeschaltet wird.

Infolge der geringen Anzahl Kommutatorsegmente kann als nicht mehr die Rede von einem konstanten Strome sein, so der Strom vollzieht sich in mehr oder weniger ausgesprochenen (lationen. Immerhin sind die Schwankungen bedeutend gering man aus der geringen Zahl Kommutatorsegmente zu schliesse neigt ist.

Die grösste Stromvariation weist die Maschine von Thon Houston mit nur 3 Segmenten auf. Dieselbe beträgt ca. 20 °/₀ und unter der mittleren Stromstärke. Bei der Brushmaschin 6 Bürsten sind dieselben dagegen kaum noch 2 °/₀.

Eine wertvolle Eigenschaft der Maschinen mit offener Wic liegt in dem überaus grossen Spannungsabfall, der es ermöglicht grosse Zahl Lampen auf einmal auszuschalten, ohne dass eine schä Stromzunahme eintritt. Diese Eigentümlichkeit hat übrigens m

---

[1]) Dass übrigens diese Zahlen nicht als Norm *sine qua non* bet werden dürfen, sondern vielfach auf althergebrachter Gewohnheit beruh weist der Umstand, dass Henry S. Carhart Bogenlichtmaschinen konst welche, trotzdem die Armatur nur 11 000 Linien besass, gut funktio (siehe Theory and design of closed coil continuous current dynamos, World 94, p. 118, 151 und 184).

Wicklung selbst nichts zu thun, sondern ist eine blosse Folge der geringen Spulenzahl.

Wir schreiten nun zur Besprechung der hauptsächlichsten Maschinen beider Gattungen:

a) Maschinen mit geschlossenen Wicklungen.

Dynamo von William Hochhausen (Excelsior Co., New York) (Fig. 170 u. 171). Die Bürstenverschiebung wird durch einen kleinen Motor *a* bewirkt, für dessen Erregung die Bügel *b* und *b'*, welche von den Polen abzweigen, das nötige Feld liefern. Gleichzeitig ist

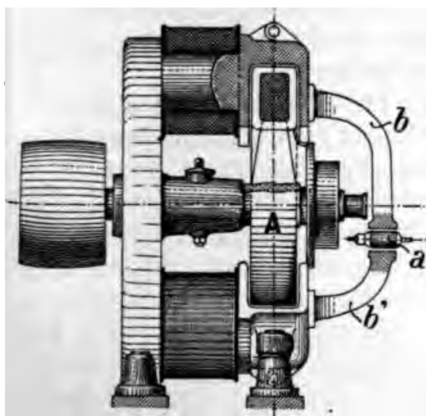


Fig. 170.

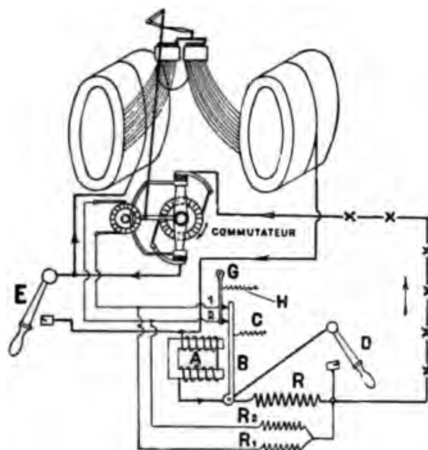


Fig. 171.

damit eine Regulierung der Feldmagnetwindungen verbunden. Zu diesem Zwecke zweigen von der einen Spule an ca. 20 Stellen Verbindungsdrähte nach einem Regulator ab, dessen Kontaktstücke Hand in Hand mit den Bürsten verschoben werden. Der Bewegungsmechanismus, der übrigens nur wenig Interesse beansprucht, ist in der Zeichnung der Übersichtlichkeit halber nur schematisch angedeutet.

Den wichtigsten Teil der Regulierung bildet das Relais, dessen Magnetspulen *A* (Fig. 171) vom Hauptstrom durchflossen sind. Je nach der Stromstärke wird nun die Feder *C* des Ankers *B* mehr oder weniger gespannt. In der mittleren Lage berührt der letztere beide Klemmen (1) und (2) der Armatur des Hülfsmotors. Die Armaturstromstärke ist also gleich Null und der Motor steht still. Nimmt der Strom beim Ausschalten von Lampen zu, so wird die Feder *C* mehr gespannt; der Kontakt (2) hört damit auf und es kann ein Teil des Hauptstromes seinen Weg von der Klemme (1) durch die kleine Armatur und den Widerstand R_2 nehmen. Ein Strom in umgekehrter Richtung entsteht, wenn der

Federzug nachlässt, wodurch die Berührung mit dem Kontakt (
aufhört. Je nachdem wird also der Motor vorwärts oder rückwärts laufe

Die Ausschalter *E* und *D* dienen schliesslich, um entweder d Maschine durch Kurzschluss der Ma nete stromlos zu machen, oder d Regulierung auszuschalten.

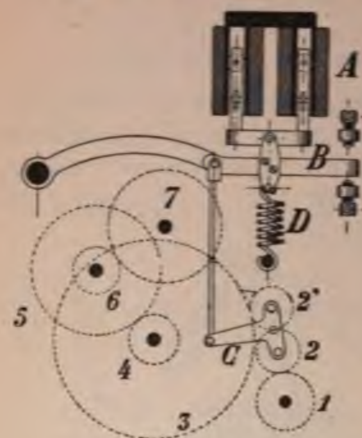


Fig. 172.

Diese Dynamo ist nicht selte mit Spannungen bis zu 5000 Vo ausgeführt worden.

Die Wood-Bogenlichtma schine (Fort Wayne Co.). Bei diese äusserst sorgfältig ausgeführten Ma schine werden verschiebbare Doppe bürsten benutzt.

Fig. 172 giebt eine allgemein Übersicht des Bewegungsmechani mus. Von den Zahnrädern 1—8 i 1 direkt auf die Armaturwelle g keilt. Die Wechselräder 2 und 2′ sin derart auf einer Scheere angebracht, dass sie in ihrer mittleren La ausser Eingriff mit dem Zahnrade 3 stehen. Ändert sich dagegen d

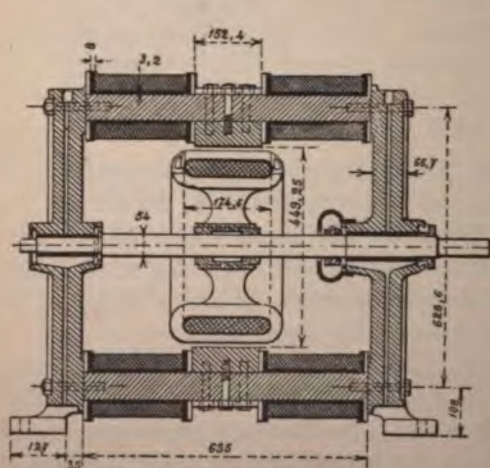


Fig. 173.



Fig. 174.

Lage des Hebels *B*, so gelangt entweder 2 oder 2′ in Eingriff, so d die Bürsten entweder nach vorwärts oder rückwärts verschoben werd Die Lage des Hebels *B* wird hierbei durch die vom Hauptstrom dur flossenen Spulen *A* reguliert.

Es gewährt immer einiges Interesse, gut ausgeführte Maschinen nachzurechnen. Hierzu sollen uns die Fig. 173 und 174 einer 25-Lampenmaschine dienen (siehe Electr. World, 9. Febr. 1895).

Die Daten dieser Dynamo sind wie folgt:

Spannung = 1200 Volt
Stromstärke = 10 Amp.
Tourenzahl = 1000.

Armatur: 100 Spulen à 57 Windungen
Drahtdurchmesser = 1,63 mm, (Sektion = 2,07 mm^2)
Widerstand von Bürste zu Bürste = 7,2 Ω heiss,
Eiseninhalt = 5550 cm^3, Dicke des Eisendrahtes = 2,6 mm.

Magnete: Pro Spule 15 Lagen à 74 Windungen,
Drahtdicke = 2,59 mm, (Sektion 5,23 mm^2)
Widerstand aller 4 Spulen 15,75 Ω heiss.

Spannungsabfall:

Ohm'scher Verlust Armatur	= 10 . 7,2 =	72,0 Volt
„ „ Magnete	= 10 . 15,75 =	157,5 „
Spannungsabfall durch Armaturreaktion (angenommen)		70,5 „
	Total	300 Volt

$$\Phi = \frac{(1200 + 300) . 60 . 10^8}{1000 . 5700} = 1{,}580000$$

Kraftliniendichte.

Sektion		Streuungskoeff. ν	B
Armatur	= 2 × 49,81 cm^2	—	1600
Luft	= 907,5	—	1740
Magnetbügel	= 2 × 35,38	1,7	

Verluste.

Armatur:	Kupfer = 72 . 10 =	720 Watt
	Hyst, (η = 0,002, ω = 16,66)	
	16,66 . 10658 . 5550 . 10^{-7} =	100 „
Magnete:	157,5 . 10 =	1575 „
Reibung:		900
	Total:	3295 Watt

$$\text{Nutzeffekt} = 100 . \frac{12000}{12000 + 3295} = 78{,}5\,\%.$$

Dynamo der Western Electr. Co., Chicago. Die Armatur ist als Trommelwicklung ausgeführt und besitzt sehr wenig Spulen. Um daher der grossen Spannung widerstehen zu können, muss diese Maschine besonders gut isoliert sein. Nicht ganz einwurfsfrei ist die Konstruktion des fliegend angebrachten Kommutators, dessen Lamellen auf Holz geschraubt sind. Die Regulierung der Spannung erfolgt durch Verschiebung der Bürsten. Der betreffende Mechanismus von Sperry ist im Prinzipe in Fig. 175 dargestellt.

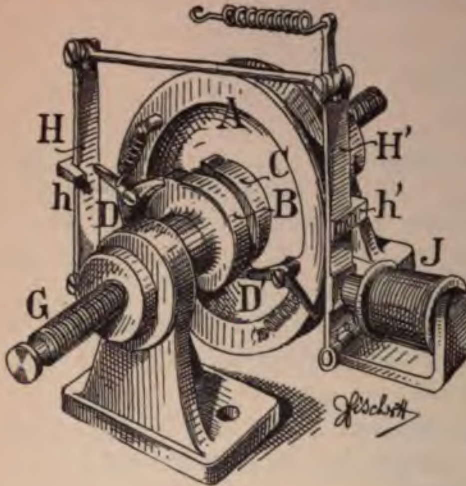


Fig. 175.

A lose Rolle von der Armaturwelle aus durch eine Saite angetrieben,
B drehbare Mutter
C mit der Schraube *G* verkeilt.

Die miteinander verbundenen Pendel *H H'* sind in der Mitte mit axial verschobenen Nasen *h h'* versehen, welche je nach der Lage der Pendel in die Klinken *D* oder *D'* eingreifen. Die Lage der Pendel wird durch den vom Hauptstrom durchflossenen Elektromagnet *J* reguliert und zwar ist die Adjustierung derart, dass in der mittleren Lage die Klinken *D D'* im Eingriff mit dem Rade *C* und der Mutter *B* bleiben. Würden dagegen die Pendel mit wachsendem Strome nach rechts gezogen, so wird dadurch die Klinke *D* gelöst und die Mutter *B* steht infolge der Reibung still. Die Stange *G* schraubt sich daher aus der Mutter *B* heraus und beschreibt eine Bewegung von links nach rechts. Das umgekehrte findet statt, wenn die Klinke *D'* gelöst wird. Die Bewegung der Schraube *G* wird durch eine Gestänge auf den Bürstenapparat übermittelt. Man macht hierbei die Beobachtung, dass sich die Bewegung der Schraube ruckweise vollzieht.

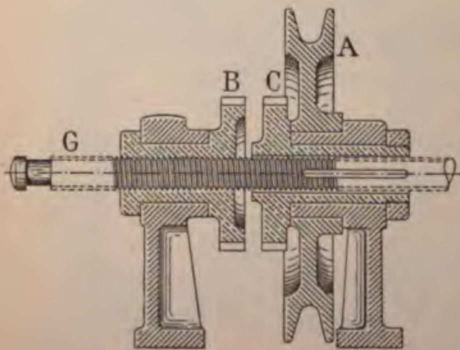


Fig. 176.

[redacted]

Bogenlichtmaschine der Standard Co. Die Armatur ist ähnlich den Siemensmaschinen mit Innenpolen aufgebaut. Bemerkt mag werden, dass die durch die Mitte führenden Bolzen nicht isoliert sind. Trotzdem lässt sich keine Erwärmung derselben konstatieren.

Sehr originell ist der Reguliermechanismus eingerichtet, durch welchen die Bürsten verschoben werden. Seine Wirkung ist indirekt und beruht auf der magnetischen Anziehung eines zwischen den Polen aufgehängten Eisenpendels (Fig. 177), mit dem der Bewegungsmechanismus (Fig. 178) in Verbindung steht. Das Rad *E* wird von der Armatur aus durch eine Saite angetrieben. Die Empfindlichkeit dieser Apparate hängt daher vom Sättigungsgrade der Maschine ab und nimmt mit zunehmender Sättigung der Magnete ab.

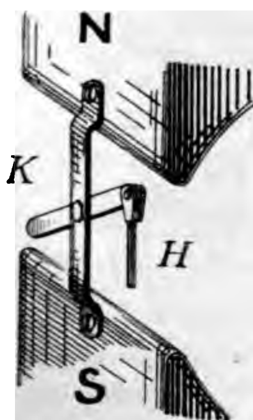


Fig. 177.

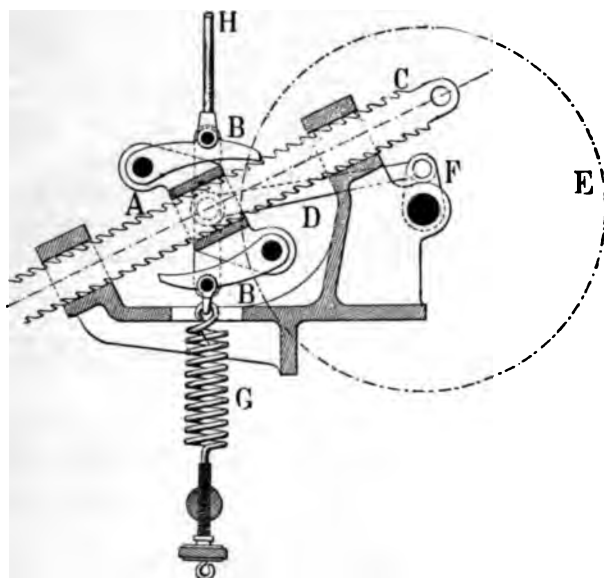


Fig. 178.

b) Maschinen mit offener Wicklung.

Dynamo Thomson-Houston. Fig. 179—181 stellen verschiedene Ansichten und Schnitte dieser historischen Maschine dar. Die kleineren Typen von 1,5—22,5 *KW* besitzen eine Trommelwicklung nach Schema Fig. 183, die beiden grössten Typen von 7,5 und 25 *KW* Ringwicklung nach Fig. 182. Das Verbindungsschema zwischen Regulator-Bürsten und äusserem Stromkreis ist aus Fig. 184 ersichtlich.

Auf dem dreiteiligen Kommutator schleifen vier einzeln verschiebbare Bürsten, wovon je 2 J, J_1 und H, H_1 durch einen Widerstand mit-

einander verbunden sind, die zweiten Bürsten bezwecken lediglich die Dauer, während welcher eine Spule eingeschaltet ist, zu vergrössern.

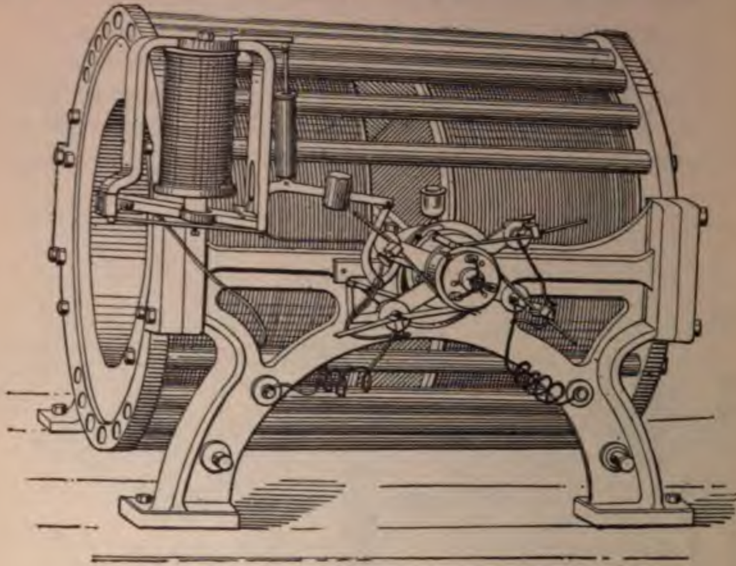


Fig. 179.

Ohne diese Vorrichtung wäre nämlich jede Spule während $^2/_3$ Umdrehung ausgeschaltet. Der maximale Winkel zwischen 2 Bürsten beträgt bei

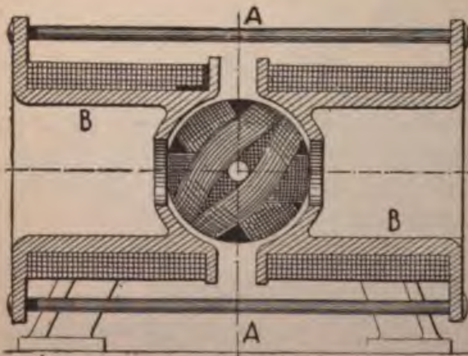


Fig. 180.



Fig. 181.

normalem Gang ca. 60° und wird durch den Regulator *A* bei einer Abnahme des äusseren Widerstandes verringert.

Für die normale Bürstenstellung sind beständig 2 Spulen parallel und mit der dritten in Serie geschaltet.

[redacted]

Das Solenoid *A* ist mit dem Relais *C*, dessen Kontakthebel durch die Stromvariation in fortwährender vibrierender Bewegung erhalten wird, in Serie geschaltet und vom Hauptstrom durchflossen. Dem Widerstande *E* fällt hierbei die Rolle eines Dämpfers zu, um einer zu grossen Funkenbildung beim Unterbruche der Kontakte vorzubeugen. Noch mag erwähnt werden, dass der Kommutator mit einem besonderen Gebläse versehen ist, um die naturgemässe Funkenbildung unschädlich zu machen. So eigentümlich die Mittel sind, welche bei dieser Maschine zur Erreichung der angestrebten Zwecke verwendet werden, so lässt sich nicht abstreiten, dass sie sich in der Praxis ganz gut bewährt hat.

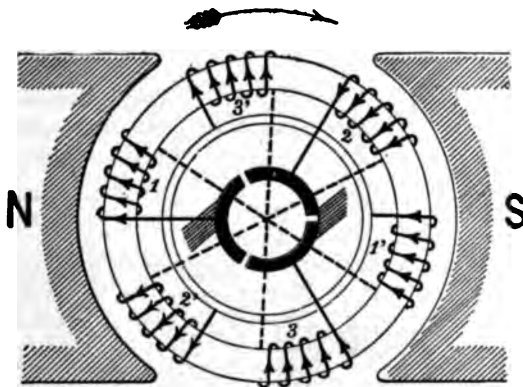


Fig. 182.

Die Brush Dynamo. Die Brushmaschine, welche mindestens ebenso alt ist wie die Thomson-Houston, beansprucht ein zweifaches

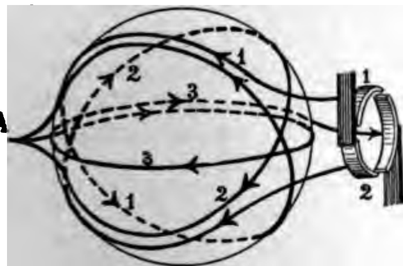


Fig. 183.

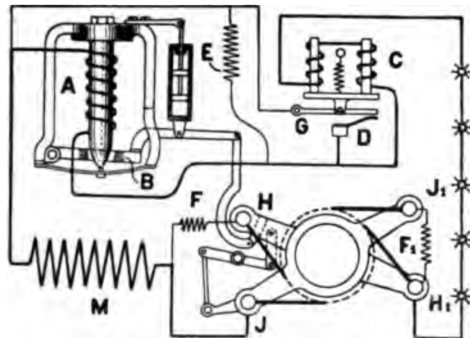


Fig. 184.

Interesse, erstens mit Bezug auf die Konstruktion, welche erlaubt, die Armatur herauszunehmen ohne die Magnete zu demontieren, und ferner mit Bezug auf ihre Wicklung. Wir beschäftigen uns hier nur mit der Wicklung, für die Konstruktion sei auf Kap. VIII verwiesen.

Diese Maschinen werden entweder mit 4 oder mit 8 Bürsten ausgeführt. Die Überdeckung der Kommutatorsegmente hat hier den gleichen Zweck wie die Anwendung von Doppelbürsten, bei der vorhin erwähnten Maschine. Aus den beiden Schemas Fig. 185 und 186 geht hervor, dass jede Doppelbürste bei der 4-Bürstenmaschine während $^1/_8$ Umdrehung, bei der 6-Bürstenmaschine während $^1/_{12}$ Umdrehung ausgeschaltet ist.

Bei der zwölfspuligen Wicklung sind für irgendwelche Lage 3, bei der vierspuligen Wicklung 2 Spulen hintereinander geschaltet. Verfolgt

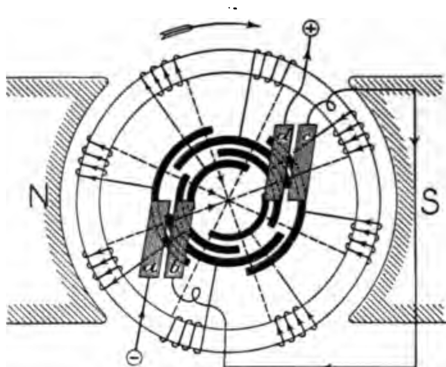


Fig. 185.

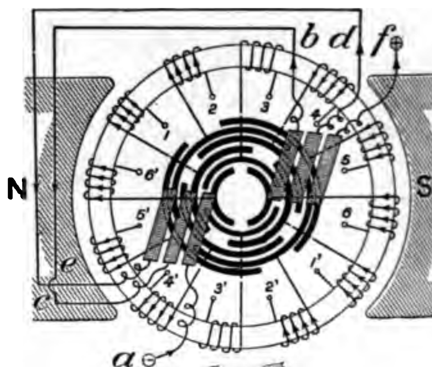


Fig. 186.

man das Schema genau für verschiedene Lage der Armatur, so wird man auch bemerken, dass die Spannung in jener Spule, welche ausgeschaltet wird, abnimmt. Da stets vor dem Unterbruch 2 Spulen parallel geschaltet sind, so hat dies zur Folge, dass die im Stromkreis verbleibende Spule bei richtiger Bürstenstellung in diesem Momente nahezu den ganzen Strom übernommen hat, sodass sich der Unterbruch mit verhältnissmässig geringer Funkenbildung vollzieht.

B. Dreileitermaschinen.

Grosse Gleichstrombeleuchtungen werden meistens nach dem Dreileitersystem (Fig. 187) ausgeführt, dessen Einzelheiten zum Teil schon früher erörtert worden. Trotz der grösseren Anlagekosten der Kraftstation, welche durch die Notwendigkeit zweier Generatoren erwachsen, hat sich dieses System wegen der Kupferersparnis für die Leitung im

allgemeinen als vorzüglich erwiesen. Es haftet ihm jedoch ein gewisser Nachteil an. So sehr man darauf Bedacht nimmt, beim Entwurfe beide Stromkreise gleichmässig zu belasten, kann es nicht ausbleiben, dass zu gewissen Stunden des Tages eine sehr grosse Stromdifferenz in den beiden Zweigen entsteht. Um daher nicht genötigt zu sein, eine der Maschinen fast leer mitlaufen zu lassen, schaltet man den positiven (+) und negativen (−) Pol zusammen (Fig. 188) und benutzt den neutralen Draht als Rückleitung. Selbstverständlich darf dies nur geschehen, wenn die Gesamtbelastung sehr klein ist, weil sonst der Leitungsverlust zu gross ausfallen würde.

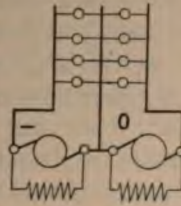


Fig. 187.

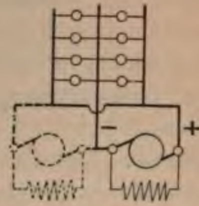


Fig. 188.

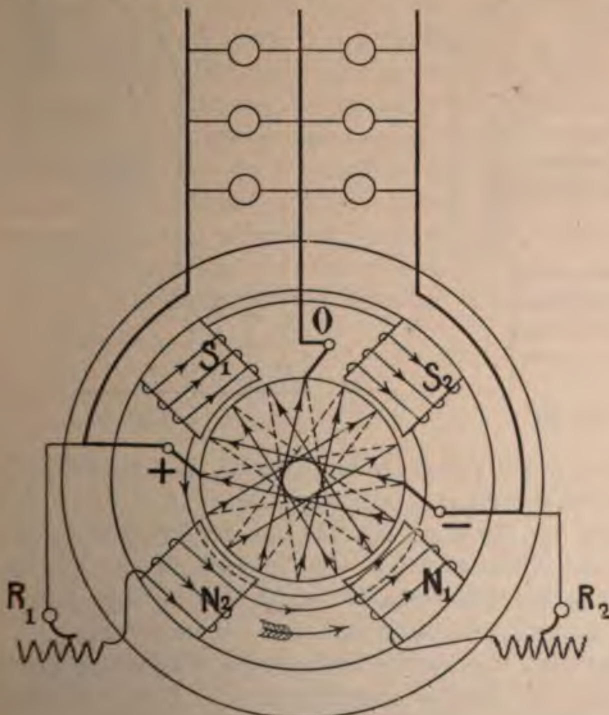


Fig. 189.

Um also den Vorteil einer einzelnen Maschine nicht zu verlieren und trotzdem die Serienschaltung beibehalten zu können, trachtet man seit einigen Jahren darnach, Maschinen herzustellen, bei welchen die Stromteilung bereits auf der Maschine vorgenommen wird.

J. A. Kingdon hat z. B. 1893 eine Dynamo dieser Art patentiert, welche wir indessen, weil bloss theoretisches Interesse beanspruchend, übergehen müssen.

Einen wirklichen Fortschritt bedeutet die nachstehend beschriebene Anordnung von G. Dettmar und A. Rothert [1]) (Elektrizitätsges. vorm. W. Lahmeyer & Co.), welche im Prinzipe mit der Dynamo von Kingdon verwandt ist. Die Maschine besitzt 3 Bürsten und 4 Pole (Fig. 189), wovon die beiden oberen, sowie die beiden unteren, gleiche Polarität besitzen. Der Querschnitt des Armatureisens muss daher, im Gegensatze zu den gewöhnlichen vierpoligen Maschinen, so disponiert sein, dass er die gesamten von einem Pole austretenden Linien aufnehmen kann.

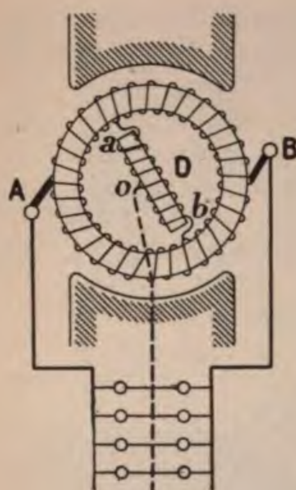


Fig. 190.

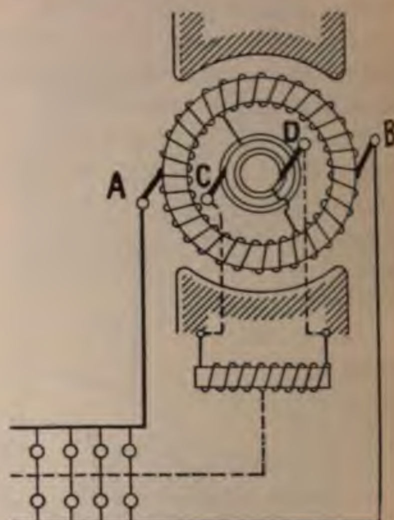


Fig. 191.

Die Erregung erfolgt kreuzweise und zwar so, dass die Pole N_1 S_1 ihren Strom von den Bürsten $O -$ erhalten, während N_2 S_2 von $O +$ abzweigt.

Nehmen wir für einen Moment, an die Bürste O sei abgehoben, so bewirkt die Armaturreaktion eine Schwächung der Pole N_2 S_2 und eine Stärkung der Feldintensität von N_1 S_1. Die Spannung zwischen $O +$ wird dadurch vergrössert und in $- O$ verringert.

Hieraus folgt, dass für die Erregung der Magnetwicklung von N_2 S_2 die Spannung bei Leerlauf massgebend ist. Wird die dritte Bürste nunmehr aufgelegt, so hat dies, je nachdem der eine oder andere der beiden Zweige mehr belastet ist, eine direkte Verringerung der Feldstärke in N_1 S_1, oder eine blosse Verstärkung des Feldes N_2 S_2 zur Folge.

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift 1897, Seite 230.

[redacted]

Die Pole N_1 S_1 werden daher zweckmässigerweise noch mit einer Kompoundwicklung versehen. Überdies ist in jede der beiden Nebenschlusswicklungen ein Regulierwiderstand eingeschaltet.

Eine Maschine dieses Systems von 2 × 110 Volt und 340 Amp. war während mehrerer Monate in der Industrieausstellung in Berlin in Betrieb. Die Versuche haben gezeigt, dass man eine konstante Spannung selbst bei vollständiger Entlastung des einen Stromkreises beibehalten kann.

Diese Anordnung ist selbstverständlich nicht an 4 Pole gebunden, sondern lässt sich mit gleichem Erfolge auf Maschinen mit einer grösseren Zahl von Polen übertragen.

Der gleiche Zweck wird bei der Maschine von Dolivo-Dobrowolsky (Electrician, 7. April 1894) auf automatischem Wege angestrebt, doch ist hier eine genügende Regulierung nur bis zu Belastungsdifferenzen von ca. 15 % erhältlich.

Das Prinzip dieser Maschine ist in Fig. 190 dargestellt. Der Mittelleiter wird von einer Spule D abgezweigt, welche einen sehr geringen Widerstand und dafür eine sehr grosse Selbstinduktion besitzt. In dieser Spule wird folglich bei der Drehung ein Wechselstrom zirkulieren, dessen Stromstärke infolge der grossen Selbstinduktion sehr klein ausfällt. Umgekehrt kann ein Gleichstrom ungehindert passieren.

Da es nicht immer angängig ist, die Induktionsspule D im Innern der Armatur zu plazieren, verwendet Dobrowolsky in solchen Fällen eine zweite Anordnung (Fig. 191) bei welcher die Spule separat aufgestellt und mit 2 Schleifringen der Armatur verbunden ist.

———————

VIII. Konstruktive Details.

A. Die Armatur.

1. Die Welle.

Der Verfasser hat wiederholt die Beobachtung gemacht, dass Dynamowellen, welche nach den üblichen Konstruktionsregeln ausgeführt waren, nach verhältnismässig kurzer Zeit brechen. So sind ihm 5 Fälle bekannt, wo Wellen von Erregermaschinen nach geringer Betriebsdauer (14 Tage bis 1 Jahr) brachen, ohne dass sich diese Brüche auf Grund der Festigkeitslehre rechtfertigen liessen, indem die maximale Belastung weit unter der Bruchbelastung lag.

Vor fünf Jahren nun erschien eine hochinteressante Arbeit über das Arbeitsvermögen von Materialien von dem leider inzwischen verstorbenen Professor Friedr. Autenheimer, früherem Direktor des Technikums in Winterthur, worin die Festigkeitslehre von einem ganz neuen Gesichtspunkte aus gelehrt wurde.[1] Der Verfasser hat sich seiner Zeit, durch die Notwendigkeit hierzu gezwungen, die Aufgabe gestellt, diese neue Theorie an einer grösseren Zahl von Wellenbrüchen zu kontrollieren und glaubt es dem Verdienste dieses ausgezeichneten Mannes schuldig zu sein, wenn er hier die Grundzüge der Autenheimer'schen Theorie, soweit sich dieselbe auf Dynamowellen bezieht, wiedergiebt.

Eine gewisse Reserve ist allerdings insofern zu machen, als sich diese Thesen auf Wellen von gleichbleibendem Durchmesser beziehen, während bei den gewöhnlichen Dynamowellen gewisse Erfahrungskoeffizienten, deren genaue Bestimmung leider vorderhand noch nicht möglich ist, zu Hilfe gezogen werden müssen.

Wir benutzen diese Theorie dennoch, weil sie einen viel genaueren Einblick in die Natur der Materialbeanspruchung als die gewöhnliche Festigkeitslehre gewährt.

[1] Genauere Angaben finden sich im Bulletin des Vereins ehemaliger Schüler des Technikums Winterthur, Mai 1894, ferner ib. Aufsatz von J. Fischer-Hinnen, Febr. 1895.)

[redacted]

Wird ein Stab von der Länge $\mathfrak{L}$ einem Zuge Z kg pro cm^2 innerhalb der Elastizitätsgrenze ausgesetzt, so verstreckt sich derselbe um $\triangle \mathfrak{L}$ und es ist bekanntlich

$$\frac{\triangle \mathfrak{L}}{\mathfrak{L}} = \frac{Z}{E}.$$

E = Elastizitätsmodul.

Bei diesem Vorgange wird eine Arbeit geleistet, von der Grösse

$$a = \frac{1}{2} \triangle \mathfrak{L} \,.\, Z,$$

oder, indem man hierin den Wert von $\triangle \mathfrak{L}$ einsetzt,

$$a = \frac{1}{2} \frac{\mathfrak{L}}{E} \cdot Z^2.$$

Sobald nun der Zug aufhört, so nimmt der Stab wieder seine frühere Gestalt an, oder, besser gesagt, und hierin liegt gerade der Schwerpunkt der Autenheimer'schen Theorie, er wird dauernd um ein äusserst kleines, vom Auge nicht bemerkbares Stück verstreckt.

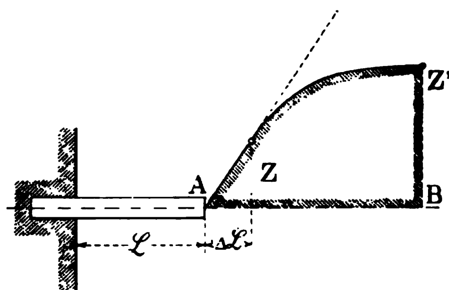


Fig. 192.

Diese Verstreckung wiederholt sich mit jedem Spannungswechsel, bis die totale Verstreckung schliesslich derjenigen der Bruchbelastung gleichkommt.

Nennt man daher

$$a' = K \frac{\mathfrak{L}}{E} Z^2$$

das bei jedem Spannungswechsel verloren gegangene Arbeitsvermögen, so ist folglich das totale Arbeitsvermögen (berechnet aus der Bruchspannung und der Verstreckung)

$$A = N \,.\, a',$$

worin N die Anzahl Spannungswechsel bezeichnet, welche der Stab bis zum Bruch aushalten kann.

Variiert die Spannung zwischen den Grössen Z_1 und Z_2 (bei Dynamowellen ist Z_1 gleich der kombinierten Beanspruchung aus Torsions- und Biegungsmoment und Z_2 gleich der Torsionsbeanspruchung), so findet Autenheimer mit Berücksichtigung der Zeitdauer eines Spannungs-

r Wellen gleich bleibenden Durchmessers.

(147) $$A = c \cdot N \cdot \frac{Z_1^2 - Z_2^2}{E} \cdot t.$$

A = Arbeitsvermögen pro cm^3 in kg = ca. 7,2 für schmiedeiserne Wellen und 6,3 für Wellen aus Kruppstahl,
c = 2,6 $\times 10^{-7}$ für Schmiedeeisen,
= 1,53 $\times 10^{-7}$ für Gussstahl,
N = Anzahl totale Spannungswechsel, welche die Welle bis zu ihrem Bruche aushalten kann, gleich doppelte Zahl Touren,
E = 1 800 000 für Schmiedeeisen,
= 2 100 000 für Stahl,
t = Zeit eines Spannungswechsels in Sekunden ausgedrückt.

Für Wellen mit verschiedenem Durchmesser ist, je nachdem sich die Abstufung mehr oder weniger stark vollzieht, die linke Seite durch einen Koeffizienten zu dividieren, der zwischen 10—40 variiert. Versuche, welche Wöhler vor einigen Jahrzehnten an Wellen von scharfen Abstufungen ausführte, zeigten nämlich die eigentümliche Erscheinung, dass die Lebensdauer je nach Umständen um das 10—40fache geschwächt wurde, gegenüber solchen mit gleichbleibendem Querschnitt. Wenn wir diesem Umstande durch den Koeffizienten 20 Rechnung tragen, so mag diese Zahl allerdings etwas rund erscheinen, es ist jedoch zu bedenken, dass der Wellendurchmesser nur mit der sechsten Wurzel desselben zusammenhängt. Würden wir also den Koeffizienten zweimal zu gross oder zu klein annehmen, so hätte dies einen Fehler von 10% + oder — zur Folge.

Die Gleichung (147) zeigt, dass für die Berechnung der Betriebsdauer nicht die maximale Spannung Z_1, sondern die Differenz $Z_1^2 - Z_2^2$ von Bedeutung ist.

Berechnet man nun die Differenz der Quadrate $Z_1^2 - Z_2^2$ für verschiedene Stellen der Welle, so zeigt sich die durch die Erfahrung häufig bestätigte Thatsache, dass bei Gleichstrommaschinen Wellenbrüche gewöhnlich zwischen dem Kommutator und der Armaturnabe, d. h. an einer Stelle eintreten[1]), wo das Torsionsmoment gleich Null ist; daraus lässt sich der wichtige Schluss ziehen: Bei der Berechnung von Dynamowellen kommt nicht das Torsionsmoment, sondern das Biegungsmoment in Betracht.

Wie wir übrigens sofort sehen werden, lassen sich auch die neuen Gleichungen zur Bestimmung des Wellendurchmessers in die nämliche Form bringen wie jene Gleichungen, welche zur Berechnung reiner

[1]) Siehe auch American Machinist, Nr. 47, 22. Nov. 1894. Der dort angegebene Wellenbruch liess sich ebenfalls mit ziemlicher Sicherheit nach der *Autenheimer*'schen Theorie berechnen.

Torsionswellen dienen. Der einzige Unterschied besteht darin, dass dem Koeffizienten vor der Klammer eine andere Bedeutung zukommt.

Eine grosse Anzahl Gleichstrommaschinen von 7—260 HP zeigten nämlich, dass im Mittel an der gefährlichen Stelle

$$Z_1 = 79000 \frac{PS}{n} \cdot \frac{1}{d^3} \text{ und}$$

$$Z_2 \doteq 0 \text{ gesetzt werden darf;}$$

$$PS = \text{Pferdestärken,}$$

$$n = \text{Tourenzahl;}$$

ferner ist

$$t = \frac{1}{2 . n . 60}.$$

Diese Werte, in Gleichung 147 eingesetzt, ergeben, wenn man die durchschnittliche Dauer einer Welle zu 30 Jahren annimmt:

Für schmiedeeiserne Wellen:

(148) $$\mathfrak{d} \text{ in cm} = 20 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 23 \sqrt[3]{\frac{W}{n}}.$$

Für Stahlwellen:

(149) $$\mathfrak{d} \text{ in cm} = 18 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 21 \sqrt[3]{\frac{W}{n}}.$$

Anmerkung. $\mathfrak{d}$ bedeutet, wie bereits erwähnt, den Durchmesser an der gefährlichsten Stelle, d. h. in der Kommutatorbüchse; die Dimensionen der Welle im Lager können etwas geringer gehalten werden.

Beispiele über die Formeln (148) und (149).

(Dynamos der Maschinenfabrik Oerlikon.)

PS	n	$\mathfrak{d}$ berechnet	$\mathfrak{d}$ ausgeführt	
7,1	1200	3,3 cm	4,0 cm	Stahlwellen
15,5	1000	4,5	5,0	
30	900	5,8	5,6	
59	700	7,9	7,5	
95	500	10,5	10,0	
260	260	18,0	14,0[1])	

Die Formeln 148 und 149 ergeben im allgemeinen für sehr kleine Kräfte zu schwache, für sehr grosse zu dicke Wellen. Kleinere Wellen müssen in der That etwas stärker gehalten werden, weil hier der

[1]) Diese Welle hat sich während dem Betrieb durch eine starke Ausbiegung als zu schwach erwiesen.

magnetische Zug, hervorgerufen durch konstruktive Mängel oder unrichtige Magnetanordnung, von viel grösserem Einflusse ist, als bei grossen. Wir werden auf den magnetischen Zug am Schlusse dieses Kapitels zurückkommen.

Es versteht sich von selbst, dass die Formeln 148 und 149 nur für die approximative Vorausbestimmung zu benutzen sind, und dass nach Aufzeichnung der Armatur eine nachträgliche Kontrolle unerlässlich ist. Für Dynamowellen darf eine Belastung von 450—550 kg pro cm² bei einer maximalen Ausbiegung von $^1/_{10}\ \delta$, wo δ für den einfachen Luftabstand der Armatur von den Polen steht, als normal betrachtet werden.

Die Dimensionen der übrigen Teile der Welle richten sich nach dem Durchmesser im Kommutator.

Der Durchmesser in der Wellenmitte ist gewöhnlich einige mm

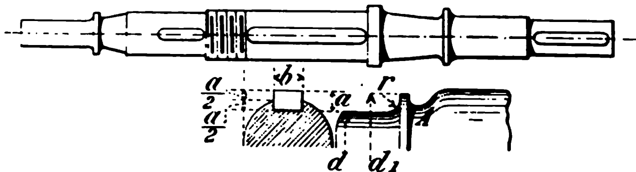


Fig. 193.

grösser als der erstere. Für die Wellendicken in den Lagern sind die Lagerdistanzen und die Höhe der Lagerläufe massgebend. Ganz approximativ mag der Durchmesser in der Wellenmitte

bei kleinen Maschinen = 1,3—1,4 mal Lagerdurchmesser,
„ grossen „ = 1,1—1,2 „ „

des Lagers gegen die Riemenscheibe sein.

Die Hohlkehlen auf der inneren Seite der Lagerläufe müssen gehörig tief und breit gemacht werden, weil sich sonst leicht das Öl der Welle nachzieht; so konnte bei einem Lager mit kleinem Ölbehälter beobachtet werden, dass sich dasselbe aus dem angegebenen Grunde innerhalb kaum 5 Minuten entleerte.

Die Verkeilung kann entweder mit einem einzelnen grösseren, oder mit zwei kleineren Keilen erfolgen, letzteres hauptsächlich, wenn die Nabe aus Bronze ist und ihre Dicke deshalb, mit Rücksicht auf die Kosten, reduziert werden muss.

Tabelle ausgeführter Dynamowellen.

PS	n	$\frac{PS}{n}$	$\sqrt[3]{\frac{PS}{n}}$	Durchmesser Wellenmitte $\mathfrak{d}_1$ cm	Durchmesser im gross. Lager $\mathfrak{d}_2$ cm	Lagerlänge $\mathfrak{l}$ cm	$\frac{\mathfrak{l}}{\mathfrak{d}_2}$	c_1 [1])	Bemerkungen
2200	75	29,4	3,1	61	—	—	—	19,7	Tramwaygenerator 1500 KW. Westend Co., Boston.
5000	250	20	2,71	—	ca. 32	ca. 62,5	1,96	—	Vertikale Westinghouse-Dynamo, Niagara.
600	60	10	2,15	60	40	65	1,63	28	Wechselstr.-Dyn. Farcot, Secteur des Champs Elysées Paris.
900	105	8,6	2,05	44	—	—	—	21,5	Allgem. Elektr. Gesellschaft.
700	100	7	1,92	45,7	—	—	—	23,8	Type MB 10—500—100 Thompson-Houston.
600	110	5,45	1,76	30	—	—	—	17	Type JL 8, Schuckert.
700	150	4,66	1,67	24	—	—	—	14,5	Vertik. Aluminium-Dynamo Oerlikon.
325	110	2,95	1,43	—	25	70	2,8	—	„ △ Dynamo Bremgarten (Oerlikon).
220	85	2,6	1,37	36	—	—	—	26	Tramwaygenerator Basel (Alioth).
500	200	2,5	1,36	—	23	50	2,18	—	Vertik. Wechselstrom-Dynamo La Goule (Oerlikon).
600	300	2	1,26	—	16	50	3,13	—	Fives-Lille (Désiré Korda).
320	235	1,36	1,11	17,5	—	—	—	15,9	Allm. Svenska Elektr. bolaget.
530	400	1,32	1,10	17,8	—	—	—	16,2	General Electr. Co.
100	260	0,385	0,73	11	10	—	—	15,1	6polige Dynamo Oerlikon.
115	435	0,264	0,64	13	10	32	3,2	20,3	Allm. Svenska Elektr. bolaget.
110	500	0,220	0,60	13,5	—	—	—	22,5	Tramwaygenerator (Alioth).
100	500	0,200	0,58	10	9	30	3,34	17,3	4polige Dynamo Oerlikon.
74	475	0,156	0,54	12,5	—	—	—	23,2	Elektr. Akt.-Ges., vorm. Lahmeyer.
90	600	0,150	0,53	12	—	—	—	22,6	„ „ „ „
74	600	0,123	0,50	11	—	—	—	22	General El. Co., Schenectady.
45	800	0,056	0,38	7	6,5	22	3,4	18,4	4polige Dynamo Oerlikon.
31	780	0,040	0,34	7,1	6	27	4,5	20,8	Hufeisen-Dynamo, G. Kapp.
7,5	1200	0,006	0,18	5	—	—	—	27,8	Elektr. Akt.-Ges., vorm. Lahmeyer.
4	1300	0,003	0,14	3,6	2,5	8	3,2	25,7	Oerlikon.

[1]) Durchmesser in der Wellenmitte $= c_1 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}}$.

Anmerkung. Die überaus grosse Verschiedenheit des Koeffizienten C_1 erklärt sich teilweise aus dem Armatur- bezw. Magnetdrahtdurchmesser. Bei der 600pferd. Wechselstrom-Dynamo Farcot beträgt beispielsweise die Ausbohrung 5,6 m; der Wellendurchmesser musste deshalb entsprechend gross gemacht werden.

Man hat diesem Teile der Dynamokonstruktion nicht die Aufmerksamkeit geschenkt, welche er verdient.

Gewisse schlimme Erfahrungen, welche der Verfasser seiner Zeit an Tramwaymotoren machte, bei welchen allerdings die Beanspruchung der Keile die denkbar ungünstigste ist, veranlassten ihn zu einer Untersuchung der verschiedenen im Gebrauch befindlichen Keiltabellen.

Es stellte sich hierbei heraus, dass die im allgemeinen Maschinenbau angewandten Keile für Dynamokonstruktion unzweckmässig sind. Der Hauptvorwurf richtet sich gegen die Höhe, welche für Bronzenaben zu gross ist, während die ursprünglich für Gusseisen berechneten Keile wiederum zu schwach für Bronze sind. Da es nun von Wichtigkeit ist, ein möglichst einheitliches System zu besitzen, und ferner bereits von vielen schweizerischen und deutschen Maschinenfabriken das System von Julius Römele, Freiburg i. B., im Gebrauch ist, so dürfte es sich im Interesse grösster Einheitlichkeit empfehlen, dieses System auch für elektrische Maschinen zu adoptieren, jedoch mit der in Tab. XII vorgemerkten Modifikation.

Die Modifikation besteht darin, dass z. B. ein Keil von 18 . 32 mm für Wellen von 111—120 mm Durchmesser zu verwenden wäre, statt nach Römele für solche von 120—124, im übrigen sind überall die gleichen Höhen und Breiten beibehalten. Es hat dies den Vorteil, dass die fertigen Keile bezogen werden können.

Magnetischer Zug.

Um den magnetischen Zug, hervorgerufen durch Abnutzung der Lager oder Ausbiegung der Welle u. s. w., zu bestimmen, mag folgendes Annäherungsverfahren eingeschlagen werden: Wir nehmen z. B. an, das Armaturzentrum A einer 4poligen Maschine (Fig. 194) werde um einen verhältnismässig geringen Betrag x aus seiner ursprünglichen Lage verschoben. Die nächste Folge hiervon ist eine Änderung der Kraftlinienintensität an den 4 Polen, entsprechend der Änderung, welche im Widerstande der magnetischen Stromkreise entstanden ist. Um die Sache nicht allzu kompliziert zu gestalten, sei angenommen, der mittlere Luftabstand der Pole II und IV sei in keiner Weise beeinflusst worden, wir haben uns daher ausschliesslich mit den Polen I und III zu beschäftigen.

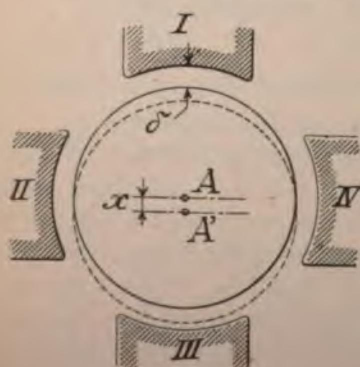


Fig. 194.

Es bedeute B die ursprüngliche Intensität in der Luft,
S der Querschnitt eines Poles,
δ der Luftabstand,
B_1 u. B_3 die Kraftliniendichte an den Polen I und III nach Verschiebung der Armatur.

Der Eisenwiderstand, welcher für eine kleine Kraftlinienänderung als konstant angesehen werden darf, kann als Bruchteil des Luftwiderstandes ausgedrückt werden, indem wir den

gesamten magnetischen Widerstand $= \alpha \times$ Luftwiderstand setzen.

Wir haben dann

$$B_1 = B \frac{2\,\delta\,\alpha}{2\,\delta\,\alpha + x}$$

$$B_3 = B \frac{2\,\delta\,\alpha}{2\,\delta\,\alpha - x}.$$

Die Zugkräfte wären demgemäss unter Anwendung der Maxwellschen Formel (Gleichung 91)

$$Z_1 = \frac{B^2 \,.\, S}{25 \,.\, 10^6} \cdot \left(\frac{2\,\delta\,\alpha}{2\,\delta\,\alpha + x}\right)^2$$

$$Z_3 = \frac{B^2\,S}{25 \,.\, 10^6} \cdot \left(\frac{2\,\delta\,\alpha}{2\,\delta\,\alpha - x}\right)^2$$

und der resultierende Zug nach unten, indem wir das Quadrat ausführen und x^2 gegenüber $4\,\delta^2\,\alpha^2$ vernachlässigen

(150) $$Z = Z_3 - Z_1 = \frac{B^2\,S}{25 \,.\, 10^6} \cdot \frac{x}{\delta\,\alpha} \cdot A.$$

Die Konstante A ist in diesem Falle gleich 2.

Führen wir die gleiche Rechnung aus, für den Fall, wo sich das Armaturzentrum unter 45° zur Magnetaxe verschiebt, so erhält man $A = 2{,}8$. Für andere Polzahlen mag die nachstehende Tabelle benutzt werden.

Tabelle der Werte von A.

Anzahl Pole	A	Bemerkungen
4	2	Verschiebung in der Richtung der Magnetachse
4	2,8	Verschiebung in der Richtung der neutralen Zone
6	6	
8	9	
12	15	
16	20	

Beispiel. Bei einer 4poligen Maschine von 50 KW mit zweiteiligem Magnetkranze biege sich die Welle 0,5 mm aus ($x = 0{,}05$)[1]. Das Armaturgewicht betrage 800 kg.

Ferner sei

$$\delta = 0{,}5 \text{ cm},$$
$$\alpha = 2,$$
$$S = 950 \text{ cm}^2,$$
$$B = 7000.$$

A ist für diesen Fall = 2,8. Wir haben also

$$Z = \frac{7000^2 \cdot 950}{25 \cdot 10^6} \cdot \frac{0{,}05}{0{,}5 \cdot 2} \cdot 2{,}8 = 260 \text{ kg} = \frac{1}{3} \text{ des Armaturgewichts.}$$

Es ist leicht einzusehen, dass diese Zahl bei etwelcher Abnützung der Lagerschalen leicht auf das Doppelte steigen kann.

Bei 2poligen symmetrischen Maschinen würde eine Verschiebung des Armaturzentrums in der Richtung der Magnetaxe fast keine Kraftlinienänderung hervorrufen, es entsteht also auch dadurch keine Zugkraft, wohl aber, wenn die Verschiebung in der Richtung der neutralen Zone erfolgt.

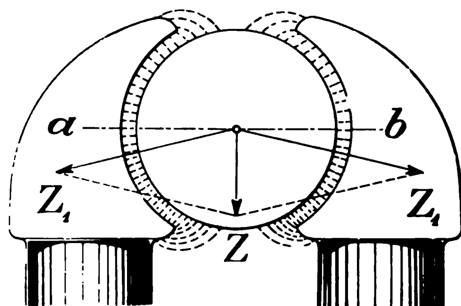


Fig. 195.

Bei unsymmetrischer Magnetanordnung, wie wir solche z. B. bei den Hufeisenmaschinen begegnen (Fig. 195), wird infolge der Verschiedenheit der Kraftlinienlängen die Magnetaxe etwas tiefer als die Horizontale zu liegen kommen. Der resultierende Zug nach unten ist daher

$$Z = 2\,Z_1 \cdot \sin \alpha,$$

worin α allerdings erst zu bestimmen wäre.

Sind die Lager nicht fest mit dem Gestell vergossen, so wäre diesem Übelstand leicht dadurch abzuhelfen, dass man durch Blechzwischenlagen die Lager höher als das Mittel der Ausbohrung setzt. Man könnte auf diese Weise unter Umständen auch einen Teil des Armaturgewichtes ausbalancieren. Bei vielpoligen Maschinen mit mehr als 2 Bürsten ist die Sache immerhin riskiert, und dürfte überhaupt nur dann daran gedacht werden, wenn die Armatur mit einer Serie-Parallelwicklung (Fig. 19 oder 29) versehen ist, da sonst die einzelnen Zweige ungleich belastet werden.

[1] Die Ausbiegung einer grossen Zahl ausgeführter Maschinen variierte zwischen 0,01—0,06 cm, die entsprechenden Belastungen zwischen 100—550 kg pro cm. Grössere Maschinen weisen gewöhnlich 400—500 kg auf.

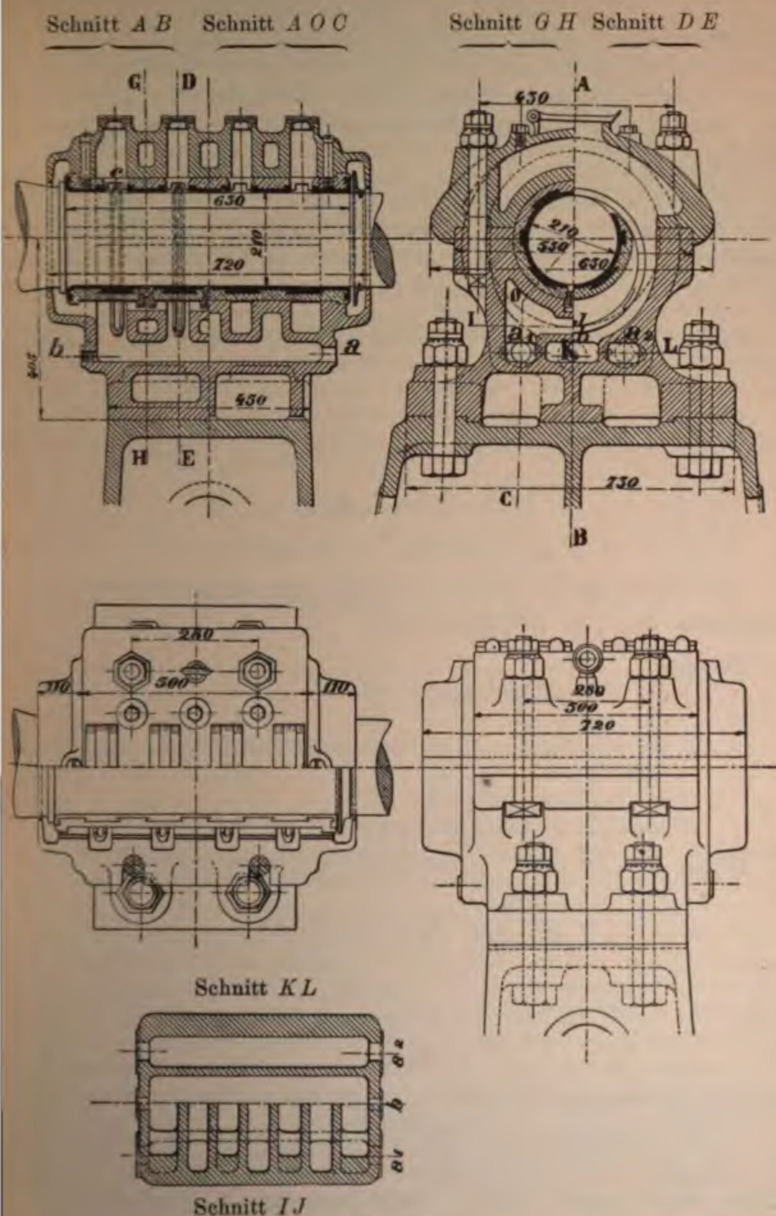


Fig. 196.

Lager einer 1000 HP Maschine bei 360 Touren mit Wasserkühlung, ausgeführt vom Verfasser.

Ganz besondere Bedeutung erlangt der magnetische Zug bei grossen Dampfdynamos, bei welchen infolge des Kolbenstosses bei jedem Hub verhältnismässig grosse Verschiebungen des Armaturmittelpunktes eintreten. Solche Dynamos müssen daher einen ziemlich grossen Luftraum besitzen, oder es muss die Feldintensität entsprechend klein gehalten werden.

Der gleiche Zweck wird auch bei der von der Maschinenfabrik J. Farcot hierfür benutzten Magnetdisposition mit Flachringarmatur erreicht, bei welcher sich auf einer Seite der Armatur nur gleichnamige Pole vorfinden. (Siehe Abschnitt IX.)

Anmerkung. Ein Blick auf die Gleichung (150) zeigt, dass die magnetische Zugkraft bei gegebener Armaturlänge etwas stärker als das Verhältnis der Durchmesser wächst. Da nun das Armaturgewicht ungefähr im Verhältnis der zweiten Potenz des Armaturdurchmessers zunimmt, so nimmt folglich der Einfluss des magnetischen Zuges mit zunehmenden Armaturdimensionen ab.

2. Die Lager.

a) Gewöhnliche Lager.

Die Lagerlänge hängt von der zulässigen Reibungsarbeit pro cm^2 Druckfläche ab (spez. Reibungsarbeit).

Es sei

- $\mathfrak{d}$ der Wellendurchmesser in cm,
- $\mathfrak{l}$ die Lagerlänge,
- P der resultierende Lagerdruck aus Armaturgewicht und Riemenzug (siehe S. 63),
- f der Reibungskoeffizient,
- F maximale zulässige Reibungsarbeit pro cm^2.

Damit sich die Lager nicht erwärmen, muss sein

$$\frac{\mathfrak{d}\,\pi\, n}{60\,.\,100} \cdot P \cdot f <= \mathfrak{d}\,\mathfrak{l}\,.\,F$$

oder

$$(151) \qquad l => \frac{P \cdot f \cdot n}{1900\,F}.$$

f variiert je nach Art der Schmierung und der Geschwindigkeit zwischen 0,04—0,08; F kann zu 1 kgm per cm^2 angenommen werden.

Es ist im allgemeinen nicht ratsam, diese Zahl zu überschreiten. Nur bei ganz vorzüglicher Schmierung kann $F = 1{,}1$—$1{,}2$ gesetzt werden, wenn immer möglich, bleibe man thunlichst unter 1.

Allgemein ist die Lagerlänge

für ganz kleine Maschinen: $\mathfrak{l} = 3{,}5$ bis $4\,\mathfrak{d}$,
„ mittelgrosse „ $\mathfrak{l} = 2{,}5$ „ $3\,\mathfrak{d}$,
„ grosse „ $\mathfrak{l} = 2$ „ $2{,}5\,\mathfrak{d}$.

[redacted]

Anmerkung. Für Maschinen mit normalen Wellengeschwindigkeiten, 2,4—2,8 m im grossen Lager dürfen wir den Reibungskoeffizient im Mittel zu 0,05—0,06 annehmen, vorausgesetzt, dass Ringschmierung verwendet wird. Diese Zahl wird kaum überschritten werden, dagegen trifft man hier und da Ausführungen, für welche $f = 0{,}04$ wird. Der Reibungskoeffizient hängt übrigens sehr von der Geschwindigkeit ab und nimmt erfahrungsgemäss mit der letzteren ab.

Um denselben für eine gegebene Maschine versuchsweise zu ermitteln, wird die Maschine als Motor leer laufen gelassen und die Spannung und Erregung bei der normalen Spannung anfangend successive verringert, jedoch unter Beibehaltung der normalen Tourenzahl. Trägt man die zugeführte Energie (Volt und Armaturstrom) als Ordinaten, die Bürstenspannung als Abscisse auf, so erhält man eine Kurve, welche mit der Spannung sehr rasch abfällt. Das letzte Stück der Kurve muss allerdings schätzungsweise gezeichnet werden, denn es empfiehlt sich, nicht unter $^1/_4$ der normalen Spannung zu gehen. Die kleinste Ordinate der Kurve entspricht dann dem Reibungsverlust in den Lagern und

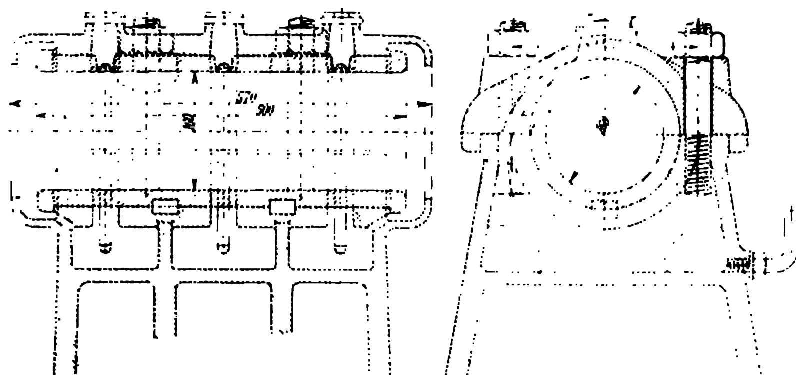


Fig. 197.

an den Bürsten bei stromlosen Magneten, während die Differenz aus der durch diesen Punkt gezogenen Parallelen mit der Abscissenaxe und den übrigen Ordinaten den Verlust durch Hysteresis und Foucaultströme darstellt, + einem additionellen Reibungsverlust, hervorgerufen durch den magnetischen Zug.

Für grössere Maschinen mag auch die Methode von Marcel Deprez benutzt werden: Die Maschine wird als Motor mit voller Geschwindigkeit angetrieben. Ist ein vollständig stabiler Gang erreicht, so wird der Strom plötzlich ausgeschaltet und an einen Tourenzähler in Zeitinterwallen von ca. 6—10 Sekunden die Zahl der Umdrehungen abgelesen bis die Armatur stille steht. Eine einfache Umrechnung ergiebt hieraus die jeweilige Umfangsgeschwindigkeit, mit welcher die Armatur im Trägheitszentrum rotierte. Selbstverständlich müssen bei diesem Versuch die Bürsten sofort abgehoben werden, da sich sonst leicht Fehler bis zu 20% ergeben können. Bedeutet nun Z die verzögernde Kraft im Trägheitsmittelpunkt gemessen, wobei

$$Z = P \cdot f \cdot \frac{r}{\mathfrak{R}}$$

gesetzt werden kann.

P = totales Gewicht der Armatur,
f = Reibungskoeffizient,

$\mathfrak{r}$ = Wellenradius,

$\mathfrak{R}$ = Abstand des Trägheitsmittelpunktes von der Wellenaxe

und es sei ferner

$g' = \frac{dv}{dt}$ die Verzögerung der Geschwindigkeit,

g = 9,81 die Beschleunigung bei freiem Fall,

so ist nach einem bekannten mechanischen Gesetze

$$g : g' = P : Z$$

oder

$$Z = P f \frac{\mathfrak{r}}{\mathfrak{R}} = \frac{P}{g} \cdot g' = \frac{P}{g} \frac{dv}{dt},$$

daher

$$f = \frac{\mathfrak{r}}{\mathfrak{R}} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{dv}{dt}. \tag{152}$$

Versuche an zwei 600pferdigen Wechselstrommaschinen des Verfassers, ausgeführt von Herrn C. H. Guilbert, ergaben einen mittleren Reibungskoeffizienten $f = 0{,}01$ bei 1,25 m Wellengeschwindigkeit ($n = 60$, Wellendurchmesser = 400 mm). Die Maschinen einmal in Gang gesetzt, drehten in einem Falle während 40 Minuten eine andere während 1 Stunde weiter, bis sie vollständig zum Stillstande kamen.

Fast sämtliche modernen Maschinen, mit Ausnahme der lokomobilen Motoren, besitzen Ringschmierung und zwar je nach der Länge des Lagers mit einem oder zwei Schmierringen. Die Erfahrung zeigt, dass man mit einem einzelnen Schmierring zur Not Lager bis 400 mm Länge schmieren kann (Dynamo von 200—250 PS), es ist jedoch ratsam, schon für viel kleinere Längen 2 Ringe anzuwenden.

Bei der Konstruktion von Lagern sollten folgende Gesichtspunkte beobachtet werden:

1. Auswechselbarkeit der Lagerschalen, letztere aus Bronze[1]) oder Guss mit Antifriktion-Ausfüllung;
2. Zugänglichkeit der Ölringe behufs Kontrolle ihres Funktionierens;
3. Möglichkeit einer raschen reichlichen Ölzufuhr, falls die Ringe ihren Dienst versagen;
4. Ringe aus nicht magnetischem Metall und nicht zu tief ins Öl eintauchend, weil ihre Reibung dadurch vergrössert und die Geschwindigkeit verringert wird;
5. Gehörige Tiefe des Ölbehälters, damit sich der im Öl befindliche metallische Staub niedersetzen kann.
6. Vermeidung einer Lagerteilung, bei welcher sich das Öl zwischen Lagerdeckel und Unterteil nach aussen ziehen kann.

Diesen Punkten ist in jeder Beziehung Rücksicht getragen bei der in Fig. 196 dargestellten Lagerkonstruktion einer 1000 *HP* Maschine

---

[1]) Aus Bronze, wenn durch die Lager magnetische Kraftlinienstreuung zu befürchten ist.

[redacted]

bei 360 Touren der Usine J. Farcot, Paris. Speziell der letzteren Bedingung ist dadurch Rechnung getragen, dass sich der Schnitt der Lagerdeckel 10 mm oberhalb desjenigen der Lagerschale befindet.

Als besonderes Merkmal mag auch angeführt werden, dass die obere Lagerschale aus einem Stück besteht und dass die Lagerschalen Wasserkühlung besitzen. Fig. 197 und 198 stellen zwei grössere Lager mit 2 und 3 Schmierringen dar, wovon das erstere von der Cie. Fives-Lilles in Givors für eine 600 *PS* Maschine bei 300 Touren, das zweite von der General Electric Co. ausgeführt wird.

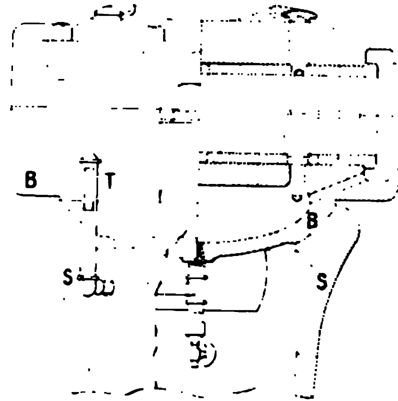


Fig. 198.

In Amerika herrscht häufig die Tendenz vor, die Lagerschalen dem Beispiele von Sellers universell einstellbar zu machen, wie z. B. nach Fig. 199 eines ältern Lagers der Westinghouse Co. zeigt. Um die etwas schwierige Herstellung der kugelförmigen Lagerausbohrung zu

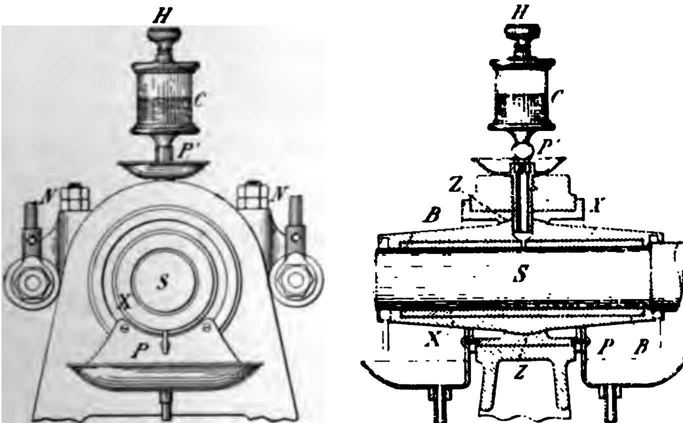


Fig. 199.

umgehen, giesst die bekannte Kleinmotorenfabrik der Crocker Wheeler Co. (siehe Fig. 200) die Lager einfach mit Komposition aus.

Eine sehr einfache Lagerkonstruktion dieser Art ist in Fig. 201 veranschaulicht. Dieselbe stellt ein Lager der Aktiengesellschaft Sächsischer Elektrizitätswerke vorm. Pöschmann & Co. dar.

Weitere Lager-Konstruktionen finden sich in Kap. IX.

Die Amerikaner wenden ferner häufig eine ausgezeichnete Methode an, um absolut genaue Lagerschalen zu erhalten, eine Einrichtung, welche übrigens seit 6 Jahren auch in Oerlikon zur Anwendung kommt, und welche allgemeine Einführung verdient. Zu diesem Zwecke werden die Lagerschalen nicht ausgebohrt, sondern es wird die Legierung um einen in der Mitte der Lagerschalen gehaltenen Kaliber gegossen, der sich in einer Führung *a* bewegt (Fig. 202). Am Ende des cylindrischen Teiles ist derselbe mit einer Schale *f* und einem Konus *d* versehen. Der cylindrische Teil *e* hat genau den Durchmesser der Bohrung.

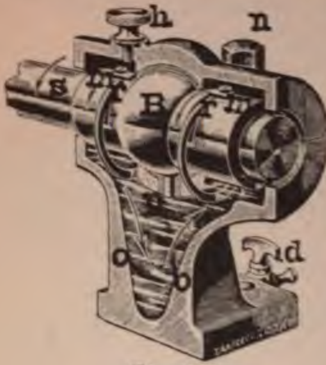
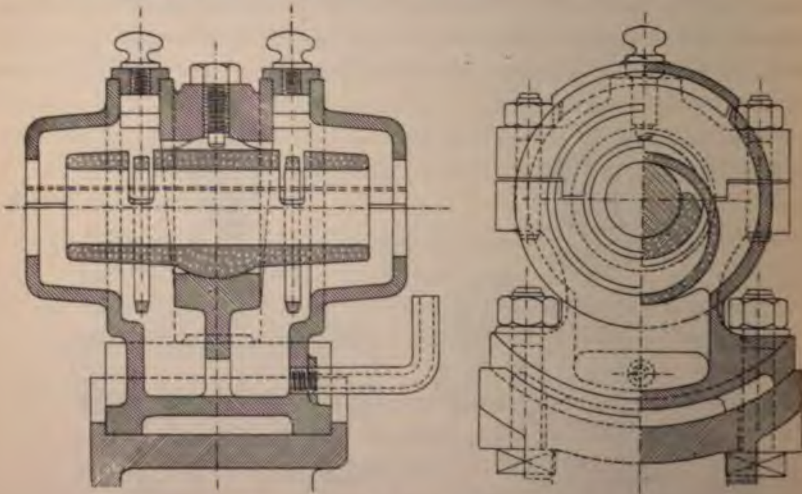


Fig. 200.

Nachdem die Komposition eingegossen und etwas erkaltet ist, wird nun der Stempel durchgestossen, worauf die Lagerschale eine überaus harte und spiegelglatte Oberfläche erhält.


Fig. 201.

Diese Methode bietet hauptsächlich grosse Vorteile bei eventueller Nachlieferung von Reservelagerschalen.

b) Kugel- und Rollenlager.

Die überaus mannigfachen Anwendungen, welche Kugel- und Rollenlager für die verschiedenen mechanischen Konstruktionen gefunden

haben, musste auch notwendiger Weise die Aufmerksamkeit des Dynamokonstrukteurs auf dieselben lenken. Die diesbezüglichen Versuche sind jedoch nicht immer geglückt und lohnt es sich wohl, die Eigentümlichkeiten dieser Lagen einer kurzen Besprechung zu unterwerfen:

Die Hauptschwierigkeit, welche sich hier entgegenstellt, ist wohl

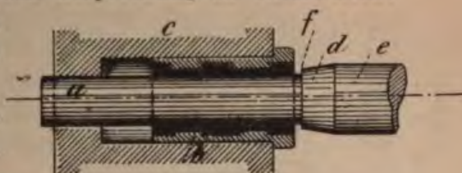


Fig. 202.

1. Die Vermeidung des Geräusches infolge der grossen Umfangsgeschwindigkeit,
2. die Betriebsunsicherheit, verursacht durch häufiges Zerbrechen der Kugeln,
3. der Preis.

Wir könnten dem noch beifügen, dass die Reibung solcher Lager im allgemeinen viel grösser ist, als man gewöhnlich nach den Katalogen annimmt.

Die beiden erstgenannten Mängel sind hauptsächlich jenen Konstruktionen eigen, bei welchen sich die einzelnen Kugeln oder Rollen berühren, wodurch an der Berührungsfläche doppelte Umfangsgeschwindigkeit entsteht. Diese Konstruktionen sind daher für Dynamomaschinen von vornherein unzulässig.

Bei den neueren Lagern herrscht die Tendenz vor, die gleitende Reibung möglichst zu verhüten und nur rollende Reibung zu erzeugen, indem man zwischen die Tragrollen noch Führungsrollen eingelegt.

Nehmen wir an, diese Bedingung sei erfüllt, so bestimmt sich der Reibungsverlust wie folgt:

$$\text{Reibungswiderstand } P' = \frac{0{,}05}{\mathfrak{R}} \cdot P.$$

$\mathfrak{R}$ = Radius der Rollen in cm.

Diese Formel gilt für Eisenbahnräder auf Eisenschinen, wo $\mathfrak{R}$ = ca. 50 cm ist. Für gehärtete Rollen und sorgfältig polierte Lagerschalen dürfen wir die Reibung vielleicht dreimal kleiner annehmen.

Es sei nun der Wellendurchmesser = 5 cm,
Durchmesser der Rollen = 1,5 cm

so ist
$$P' = \frac{0{,}05}{0{,}75 \cdot 3} P = 0{,}022\, P$$

während er für gewöhnliche Lagen = 0,06 P ist.

Die Umfangsgeschwindigkeiten verhalten sich ferner wie 2 : 1.

Die Reibung ist daher im günstigen Falle

$$= \frac{0{,}022}{0{,}06} \cdot \frac{1}{1{,}2} = 0{,}185$$

derjenigen der gewöhnlichen Lager.

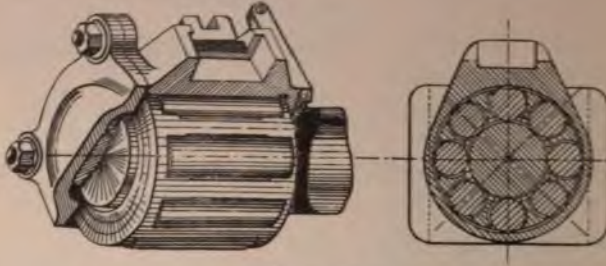


Fig. 203.

Da es nun kaum möglich ist, die gleitende Reibung vollständig zu unterdrücken, so wird dieses Verhältnis noch ungünstiger.

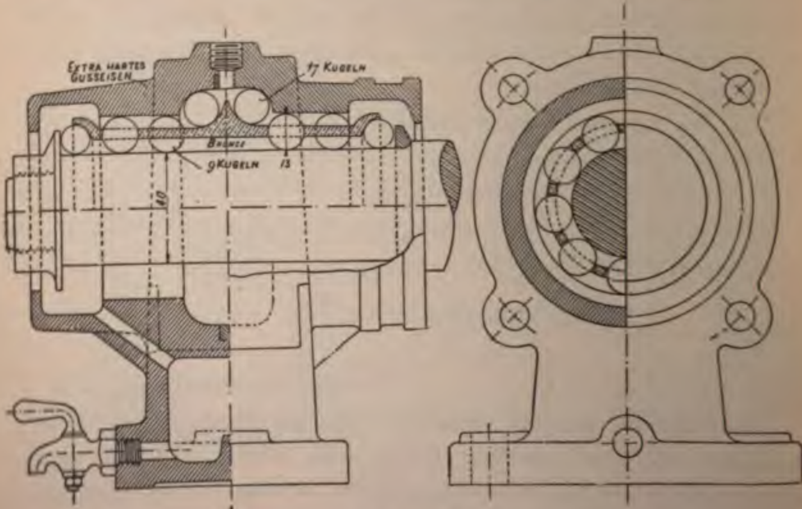


Fig. 204.

Die Roller Bearing Co., welche hierüber sehr genaue Versuche angestellt hat und deren Konstruktionen zu den besten gehören, giebt die Ökonomie nur zu 15—20 % während der Bewegung und 60—80 % beim Anlaufen an. Dagegen wird der Verbrauch von Schmiermaterial um 25—50 % reduziert.

[redacted]

Nach den Angaben dieser Gesellschaft müssten z. B. die Rollen eines Lagers mit 4000 kg Lagerdruck bei 500 Touren eine Länge von 20 cm haben. Nach W. Bayley Marshall wächst die zulässige Last von Rollenlagern mit dem Quadrate des Rollendurchmessers. Man rechnet z. B. für Rollen von 1,9 cm Durchmesser 40 kg pro cm Länge. Bei 3,8 cm dürfte also die Last 160 kg betragen. Für kleinere Lager von 5—10 cm Wellendurchmesser variiert die Rollenlänge zwischen 2,1—1,6 mal dem Wellendurchmesser. Rollenzahl gleich 7—8. Fig. 203—205 zeigen einige Formen ausgeführter Kugel- und Rollenlager.

Fig. 203 giebt Ansicht und Schnitt eines solchen Lagers, ausgeführt von der Roller Bearing Co. Dieses Lager hat sich sehr gut bei Eisenbahnen bewährt und zwar bis zu einen Druck von 4000 kg pro Lager bei 60—100 km Geschwindigkeit.

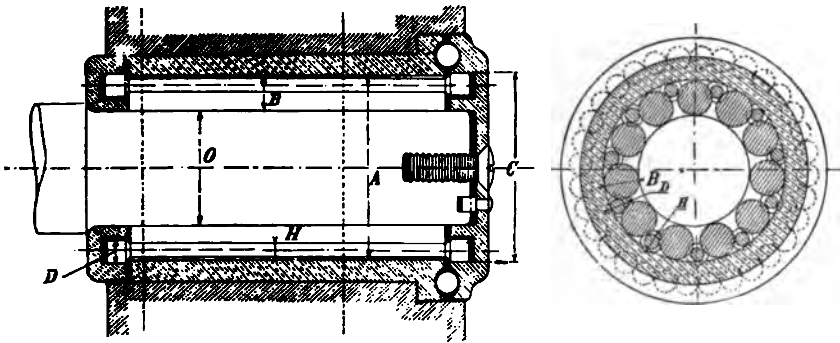


Fig. 205.

Bei einem Raddurchmesser von 1 m entspricht dies 320—530 Touren per Minute.

Die gleiche Gesellschaft konstruiert gegenwärtig auch Lager für Dynamomaschinen, welche nur wenig verschieden von der soeben beschriebenen Konstruktion sind.

Fig. 204 stellt ein Kugellager des Verfassers dar. Um eine Berührung der Kugeln zu verhüten, sind die letzteren durch eine Bronzebüchse mit Löchern geführt. Diese Büchse dient auch gleichzeitig, um ein axiales Verschieben der Welle zu verhüten. Die Schmierung kann entweder durch einen Tropfbecher erfolgen, oder dadurch bewirkt werden, dass man die Führungsbüchse in der Mitte ins Ölreservoir tauchen lässt. Dieses Lager ist bei der in Fig. 118 und 119 dargestellten 2poligen Maschine benutzt.

Bei der in Fig. 205 dargestellten und patentierten Konstruktion von G. Philippe in Paris ist die gleitende Reibung auf origir

durch die Einlage von Führungsrollen umgangen. Um diese Bedingung zu erreichen, muss das Verhältnis

$$O : C = H : D$$

sein.

c) Spur- und Ringlager.

Nicht selten werden Dynamos vertikal ausgeführt und direkt mit der Turbine gekuppelt. In vielen Fällen ist der Turbinen-Konstrukteur bereit, das ganze Gewicht durch hydraulischen Gegendurck zu entlasten, die Konstruktion der Dynamolager vereinfacht sich dadurch wesentlich. Diese Anordnung verdient in manchen Beziehungen den Vorzug. Ausnahmsweise kommen jedoch auch Fälle vor, wo dem Dynamokonstrukteur die Aufgabe zufällt, das Gewicht der Armatur zu entlasten. Nicht immer ist dies mittelst eines Spurzapfens möglich, da oftmals das Gewicht und die Tourenzahl zu gross sind.

In solchen Fällen wendet die Maschinenfabrik Oerlikon den von ihr patentierten magnetischen Entlastungsapparat (Schweiz. Pat. 25. Nov. 1893) an (für die Berechnung siehe Gleichung 91).

Soll ein wirklicher Erfolg hierbei gesichert sein, so müssen folgende Sicherheitsvorschriften beobachtet werden:

1. Ist die magnetische Anziehungskraft vom Quadrate der Poldistanz abhängig. Es sollte daher durch einen geeigneten Spurzapfen das freie Spiel sowohl nach unten als nach **oben** ganz abgegrenzt werden; nach oben insbesondere, wenn das Gebälke, auf welches die Dynamo montiert werden soll, etwas leicht ist und sich durchbiegen kann.

2. wird das Turbinengehäuse durch den Wasserdurck deformiert, so dass der dem Entlassungsapparate zufallende Druck in Wirklickeit viel grösser ausfällt, als das blosse Armaturgewicht nebst Welle und eventuellem Turbinenrad.

Es ist deshalb in allen Fällen ratsam, einen Widerstandsregulator in den Magnetstromkreis dieses Apparates einzuschalten, welcher die Stromstärken innerhalb genügend weiten Grenzen zu ändern gestattet.

Für Spurzapfen giebt J. J. Reifer[1]) folgende Tabelle an:

[1]) J. J. Reifer, Einfache Berechnung von Turbinen, 2. Aufl. A. Raustein, Zürich.

[redacted]

Spurzapfen in cm.

Belastung in kg	Touren per Minute					
	bis 140	150	200	300	400	500
1000	4,0	4.2	4.6	5,3	5.9	6.3
2000	5,8	6.0	6,5	7,5	8,3	8.8
4000	8,3	8,5	9,2	10,3	11,8	12.5
6000	10,0	10.2	11,2	13.0	14.3	15,2
8000	11,4	11.8	13.0	15,0	16.5	17,6
10000	13,0	13.3	14,6	16.7	18,4	
12500	14,5	15,0	16,5	19.0		
15000	15.8	16,0	17.8			
17500	17,2	17,5				
20000	18,5					

Diese Durchmesser gelten für sogenannte Vollzapfen, d. h. für Stupfen, bei welchen sowohl im Spurzapfen als in der Spurplatte im Centrum nur ein kleines Loch von 0,5—1 cm gebohrt ist.

Erfolgt die Aufhängung der Turbinen an der Dynamomaschine, so sind Ringzapfen vorzusehen. Eine Ausführung dieser Art zeigt Fig. 272. Das aufgehängte Gewicht betrug in diesem Falle 350 kg bei 1200 Touren. Der Ring hatte folgende Dimensionen: äusserer Diam. = 9,2 cm innerer Diam. = 4,4 cm. Ein Versuch von 2 Stunden ergab, dass dieser Motor ohne zu starker Erwärmung auch ohne den magnetischen Entlastungsapparat funktionieren kann, wobei die Beanspruchung 2,2 (!!) pro cm^2 entspricht. Für normalen Betrieb sollte man jedoch eine Beanspruchung von 0,8 — 1 kgm nicht überschreiten.

Das gleiche Lager wurde versuchsweise in ein Kugellager umgewandelt mit 9 Kugeln von 2 cm Durchmesser. Die Kugeln rotieren zwischen 2 horizontalen gehärteten Stahlscheiben und sind gegen die Centrifugalkraft dadurch gehalten, dass sie in eine mit Löchern versehene Bronzescheibe versenkt sind von ca. 1,8 cm Dicke. Mittl. Diam. der Scheibe im Teilkreis gemessen = 7,2 cm.

Diese Anordnung hat sich während einem mehrmonatlichen Betrieb als ausgezeichnet bewiesen und hat den magnetischen Entlastungsapparat vollständig überflüssig gemacht.

3. Riemenscheiben und Seilscheiben.

Die **Riemendicke** ergiebt sich aus der Formel

(158) $$\mathfrak{g} = \frac{PS}{\gamma \cdot \mathfrak{b} v} \text{ cm.}$$

PS Pferdestärken,
$\mathfrak{b}$ Riemenbreite in cm,
v Riemengeschwindigkeit in m,
γ Koeffizient, der nach F. Reuleaux

für	Lederriemen	= 0,16—0,30,
„	Baumwollriemen	= 0,11—0,21,
„	Kautschuckriemen	= 0,15—0,25

zu nehmen ist.

Einfache Lederriemen haben 0,4—0,6 cm, Doppelriemen 0,6—1,5 cm Dicke, Baumwoll- und Kamelhaar-Riemen werden selbst bis zu 1,8 cm hergestellt.

Die Riemengeschwindigkeit ist bei

sehr kleinen	Maschinen	= ca.	8—10 m,
bei mittelgrossen	„	=	12—16 m
und bei grossen	„	bis	20 m,

wobei jedoch amerikanische Konstrukteure selbst bis auf 25 m und mehr gehen.

Es wäre nun unrichtig, aus dem angenommenen Riemenscheibendurchmesser, bezw. der Riemengeschwindigkeit und der Riemendicke, die Scheibenbreite auszurechnen; man thut besser, sich bezüglich der Breite etwas an die bestehenden Ausführungen zu halten. Dies ist schon deshalb geboten, weil die gewöhnlichen Formeln keine Rücksicht auf das Gleiten des Riemens nehmen.

Hierfür mag mit Vorteil die Formel (154) benutzt werden. Setzt man nämlich

(154) $$\mathfrak{b} = c \cdot \frac{PS}{v},$$

so giebt die am Schlusse stehende Tabelle XII die Mittelwerte der Grösse c, aus den Riemenscheibentabellen von 8 der ersten Maschinenfabriken[1]) graphisch abgeleitet. Zu der letzten Chiffre dieser Tabelle ist zu bemerken, dass sie sich auf eine Dampfmaschine bezieht, welche auf einer Riemenscheibe der Transmission arbeitete. Für Dynamos dagegen ist es nicht rätlich, unter $c = 5$ als Minimum zu gehen.

Für Maschinen bis ca. 400 *PS* lässt sich die Tabelle angenähert durch die Formel ausdrücken

(155) $$c = 18 \sqrt{\frac{v}{PS}}$$

[1]) Thomson-Houston, Westinghouse, Crocker Wheeler, Oerlikon, Ganz & Cie., Allgem. Elektr. Gesellschaft, Schuckert und J. Farcot.

[redacted]

oder

(156) $$\mathfrak{b} = 18 \sqrt{\frac{PS}{v}}\,.$$

(157) $$\mathfrak{g} = \frac{1}{18\gamma} \sqrt{\frac{PS}{v}}$$

als Minimum für Lederriemen.

Riemenübertragungen finden sich in Amerika in ausgedehnterem Massstabe als in Europa, und zwar mit Riemenbreiten bis über 2 m, warum, ist nicht recht einzusehen, weil solche Riemen unverhältnismässig teuer zu stehen kommen, ganz abgesehen von der verminderten Betriebssicherheit. Ein Unfall veranlasste auch seinerzeit eine der grössten Tramway-Gesellschaften in Amerika, die Atlantic Ave. R. R. Co. in Brooklin, ihre breiten Riemen durch zwei nebeneinander liegende von halber Breite zu ersetzen.



Fig. 206.

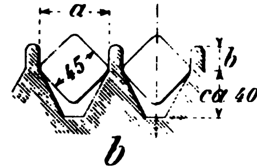


Fig. 207.

Leerrollen zum Spannen der Riemen bei kurzer Riemenscheibendistanz sind, wenn immer möglich, zu vermeiden, weil sie die Dauer des Riemens sehr benachteiligen. Es ist mir ein Fall bekannt (Licht-Centrale des Secteur des Champs Elysées in Paris), wo der Riemen alle 14 Tage repariert werden musste. Die Riemenscheibendistanz betrug hier nur ca. 3 m 500.

Für Maschinen, bei welchen $\frac{PS}{v} > 6—10$ ist, wird auch sehr häufig Seiltrieb angewandt.

Für runde Seile gilt folgende Formel

(158) $$\mathfrak{d}^2 \,.\, m = \gamma \,.\, \frac{PS}{v}\,.$$

m Anzahl Hanfseile,
$\mathfrak{d}$ Durchmesser in cm,
γ Konstante, variiert zwischen 10—23.

Wie grosse Freiheit sich die Konstrukteure bei der Wahl dieser Konstanten γ erlauben, zeigt, dass Tremlett Carter im Electrician Seildimensionen angiebt, für welche $\gamma = 9{,}3 - 12{,}8$ ist; die Dynamos von Alioth in Basel weisen die Konstante $\gamma = 11{,}5 - 13$ auf, für die Seile der Maschinenfabrik Oerlikon ist γ im Mittel gleich 14 und M. Seiffert giebt schliesslich den Wert von γ zu 15—25 an.[1])

Tabelle ausgeführter Seilscheiben der Maschinenfabrik Oerlikon (Fig. 206).

$\frac{PS}{v}$	PS	v	$\mathfrak{T}$ cm	$\mathfrak{b}$ cm	m	$\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{b}}$	Beanspruchung pro cm² kg	γ	Dimensionen der Rillen			
									β	a	t	r
18,9	350	18,5	133	5	12	26,5	6	12,5	45°	5,5	6,15	2
16,1	380	23,6	150	5	14	30	4,4	17	46°	5,5	6,5	1,7
15,3	200	13,1	100	5	6	20	9,75	7.7	45°	5.5	5,7	1,8
12,7	300	23,6	150	5	10	30	4,9	15,4	46°	5.5	6,5	1,7
9,6	200	20,8	110	4	6	27,5	9,6	7,8	45°	5,3	6,5	1,4
9,2	200	21,7	69	4	8	17,2	6,8	10,9	45°	5,6	—	—
6,25	150	24	95	4,5	5	21	5,9	12,6	46°	5,5	5,4	2,5
6,2	140	22,6	108	4,5	6	24	4,8	15,3	48°	5	6.5	2,5
6,13	125	20,4	78	4	9	19,5	4,1	18,4	45°	4.8	5,8	1,6
5,66	140	24,7	118	4,5	6	26,2	4,4	16,8	48°	5	6.5	2.5
5.43	100	18,4	78	4	6	19,5	5,4	13,8	45°	5,1	6,5	1,8
4,9	100	20,4	130	5	4	26	4,7	16	45°	5,4	6,2	1,8
3,28	60	18,3	100	3,5	6	28,5	4,3	17,5	45°	3,9	4,6	—

Die grossen Verschiedenheiten in den Ausführungen ein und derselben Maschinenfabrik dürften vielleicht überraschen; es muss jedoch hinzugefügt werden, dass fast sämtliche dieser Seilscheiben auf Bestellung und nach speziellen Angaben des Turbinenkonstrukteurs angefertigt wurden.

In neuerer Zeit haben sich auch viereckige Hanfseile nach Patent J. H. Beck, Schaffhausen (Fig. 207), eingebürgert, welche folgende Vorteile besitzen sollen:

1. Die Seile können sich nicht drehen, der Verschleiss ist daher geringer; überdies können dieselben später gewendet werden.

2. Die Konstruktion des Seiles erlaubt es, dasselbe in vollständig getrocknetem Zustande zu flechten, so dass sich dasselbe nachträglich nicht mehr streckt.

Der Katalog obiger Firma erhält folgende Angaben über die Kraft, welche mittelst eines Seiles von 4,5 cm übertragen werden kann.

Zahl der Seile.

P S	Seilgeschwindigkeit in m per Sekunde			
	12	15	18	20
10	1	1	—	—
20	1	1	1	—
50	2	2	2	2
80	3	3	2	2
100	4	3	3	2
150	5	4	3	3
200	7	6	5	4
250	9	8	6	5
300	10	9	7	6
400	14	11	9	8
500	16	14	11	10

4. Der Armaturkörper.

)ie Isolation der Eisenscheiben voneinander geschieht ent- durch Einlage von Papierscheiben von ca. 0,04 — 0,06 mm Dicke

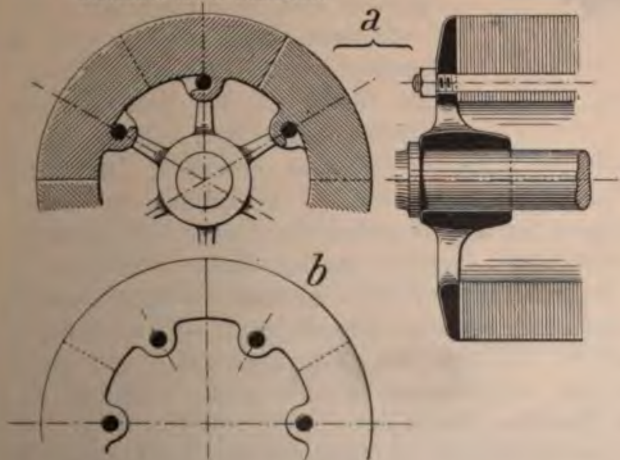


Fig. 208.

Lakieren der Bleche, oder durch Anwendung von Blechen, welche er Oberfläche oxydiert sind. Die letztere Methode ist beispiels- bei der Edison Co. in Schenecdady, New-York, im Gebrauch. Ob liger als Papierisolation zu stehen kommt, lässt sich hier nicht eiden.

Verschiedene Dynamofabrikanten verwenden zum Lackieren der Bleche spezielle Maschinen mit elastischen Walzen, wodurch der Lack sehr gleichmässig aufgetragen wird.

Eine ganz vorzügliche Isoliermethode besteht auch darin, dass die Papierscheiben mittels Schellack auf die Eisenscheiben geklebt werden, bevor man die Nuten stanzt. Auf diese Weise werden die Papiereinlagen zu gleicher Zeit gestanzt und was die Hauptsache ist, die Armatur bildet sozusagen einen massiven Eisenklotz, der seine Form, nachdem er die hydraulische Presse verlässt, beinahe nicht mehr ändert, während im andern Falle den Blechen noch eine gewisse Federkraft innewohnt, die imstande ist, den Armaturstern zu zersprengen. Bei diesem Verfahren müssen die Blechscheiben unter der Presse erwärmt werden; nach ca. 2 — 3 Stunden sind die Bleche dauernd aneinander gekittet.



Fig. 209.

Da die Blechdicke gewöhnlich 0,5 bis 0,6 mm beträgt, wird der Gesamtquerschnitt folglich — kleine Unebenheiten der Bleche eingerechnet — zu ca. 85 — 90 % ausgenutzt.

Zackenarmaturen werden entweder vor dem Zusammensetzen gestanzt oder nachher gefräst; ein Stanzen, nachdem die Bleche gepresst sind, ist nicht rätlich, weil es leicht vorkommen kann, dass einzelne Zähne abgerissen werden. Um zu verhüten, dass sich die Bleche an den Bearbeitungsstellen berühren, empfiehlt es sich, an einer grösseren Zahl Stellen dickere Papiereinlagen zu verwenden. Dem Verfasser sind mehrere Fälle bekannt, wo sich eine Erwärmung der Zacken nur auf eine Berührung der Bleche zurückführen liess und vermieden werden konnte, indem man dieselben nachher sauber bearbeitete. In einem speziellen Falle nahm die Erwärmung nach der Bearbeitung der Zacken mit der Feile, die, nebenbei bemerkt, nicht sehr sorgfältig ausgeführt war, sogar zu. Es zeigt dies, dass diese Arbeit mit äusserster Gewissenhaftigkeit vorgenommen werden muss, wenn sie zu dem gewünschten Resultate führen soll.

Für die Endscheiben zu beiden Seiten der Armatur werden gewöhnlich Bleche von 2 — 3 mm verwendet. Dieselben müssen an den Zacken sorgfältig abgerundet werden, damit die Isolation der Wicklung nicht zerschnitten wird. Um sicher zu gehen, benutzen daher verschiedene Konstrukteure noch besondere Fiberplatten von 4—5 mm Dicke, welche über die Endscheiben gelegt und mit den letzteren gefräst werden (siehe 2polige Dynamo der Maschinenfabrik J. Farcot, Kap. IX).

[redacted]

Eisendrahtarmaturen scheinen so ziemlich ausser Kurs gekommen zu sein, aus naheliegenden Gründen.

Bei Maschinen mit seitlichen Polen besteht die Armatur aus aufgewickeltem Eisenband mit Papiereinlage, im übrigen ist dieser Type heute weniger mehr vertreten als früher, zum Teil vielleicht, weil das Eisenband bedeutend teurer als Eisenbleche ist.

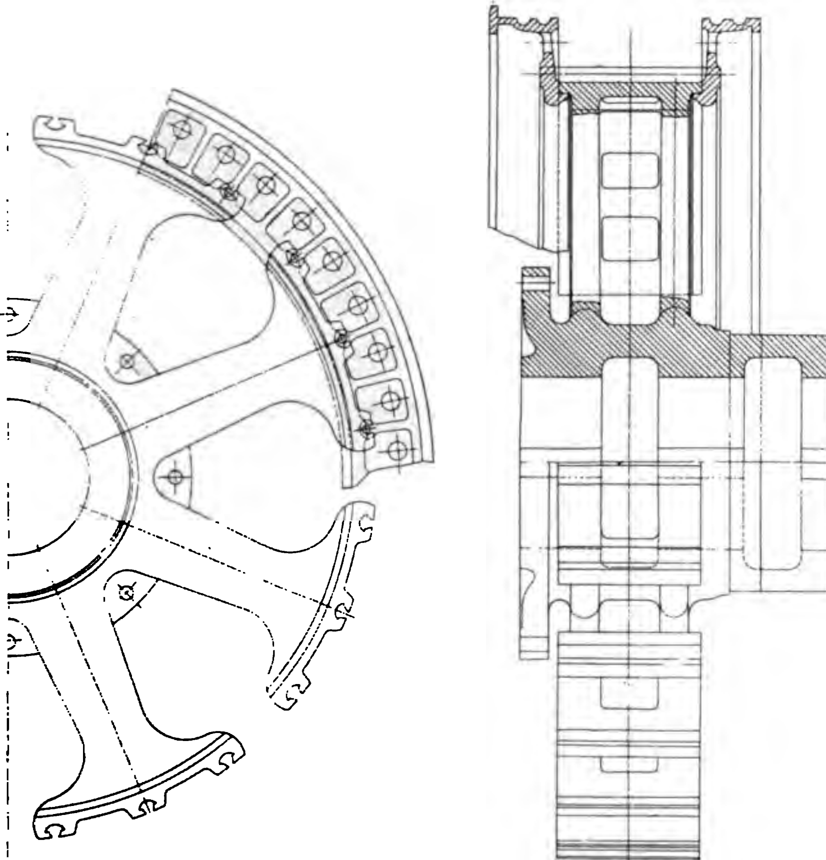


Fig. 210.

Armaturbleche lassen sich im allgemeinen nur bis zu einem Durchmesser von 1 — 1,2 m aus einem Stücke herstellen, für grössere Armaturen müssen dieselben aus mehreren Stücken zusammengesetzt werden. Die Verbindung der einzelnen Segmente geschieht auf verschiedene Weise, wie die Figuren 208 und 210 zeigen, die keiner weiteren Erklärung bedürfen.

208, *a* Methode von Wood, Cleveland,

208, *b* „ „ G. Kapp,

209, *a* Methode der Maschinenfabrik Oerlikon (früher benutzt),
210 „ „ General Electric Co.

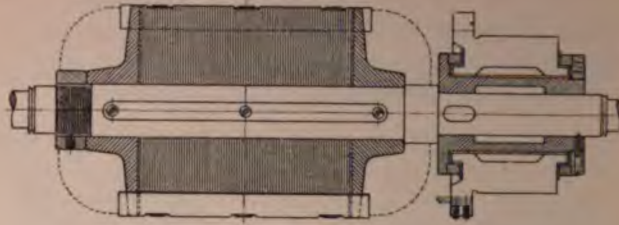


Fig. 211.

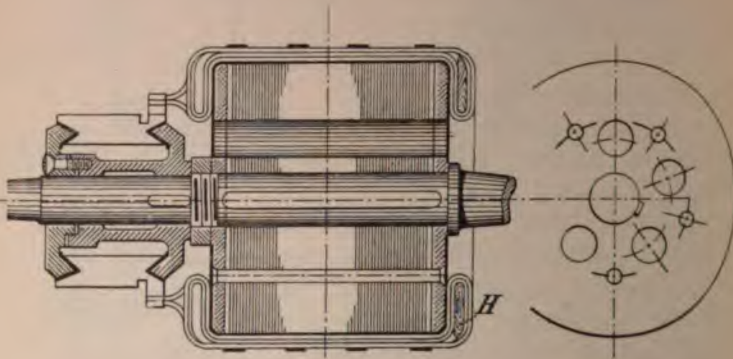


Fig. 212.

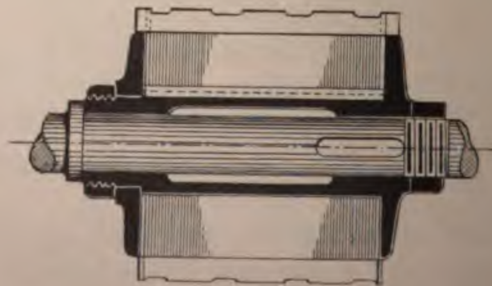


Fig. 213.

Eine noch einfachere und billigere Methode besteht darin, die Bolzen in den Eisenkern zu verlegen und dieselben in grösserer Zahl vorzusehen (Fig. 209, *b*). Wie am Schlusse dieses Abschnittes gezeigt werden soll, ist es in den meisten Fällen unnötig, diese Bolzen zu isolieren.

[redacted]

Bezüglich der Anbringung der Eisenscheiben auf der Welle sollen hier nur die charakteristischen Konstruktionen angeführt werden, da der vorgesehene Raum zu knapp ist, um auch die verschiedenen mehr oder weniger unwesentlichen Nüancierungen zu berücksichtigen.

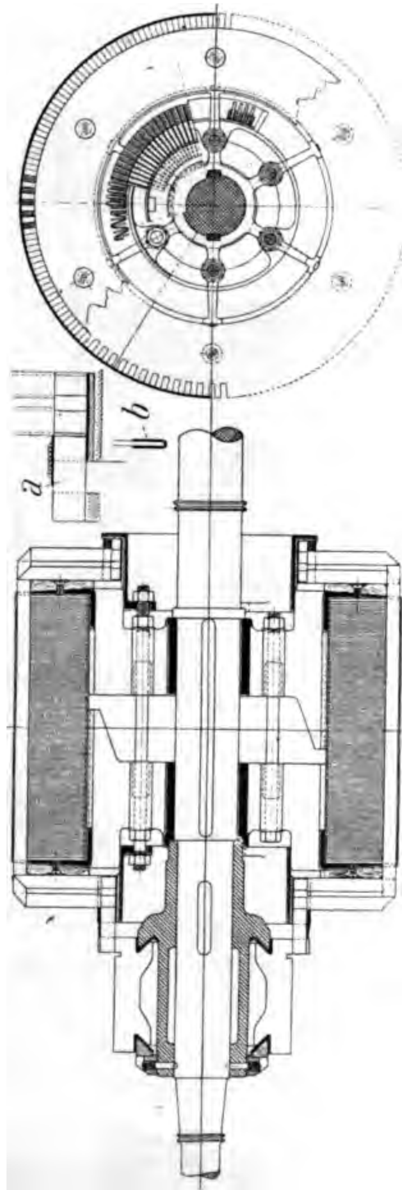


Fig. 214. Maschinenfabrik Oerlikon.

Bei Fig. 211[1]) (Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Lahmeyer & Co.), einer für kleine Armaturen sehr häufig angewandten Anordnung, sind die Bleche direkt auf die Welle gestossen und durch eine Mutter gehalten. Werden solche Maschinen im Interesse einer billigen Herstellung in grösserer Anzahl auf Lager angefertigt, so hat diese Konstruktion allerdings einen gewissen Übelstand, wenn nachträglich spezielle Wellen verlangt werden, wie dies bei Motoren kaum zu vermeiden ist. Dieser Nachteil ist bei den Armaturen (Fig. 212 und 213) umgangen, da hier die Welle selbst dann ausgewechselt werden kann, wenn die Wicklung bereits hergestellt ist. Speziell die Anordnung Fig. 212, welche im Prinzipe von der Westinghouse Co. in Pittsburgh herrührt und von der letztern selbst für ganz grosse Wechselstrommaschinen benutzt wird, hat mannigfaltige Vorzüge. Der Hauptvorzug besteht darin, dass ein besonderer Armaturstern wegfällt, dagegen sind kostbillige Stanzen erforderlich.

[1]) Die Figuren Nr. 215, 216, 218, 223 sind dem Buche „Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen“ von E. Arnold entnommen.

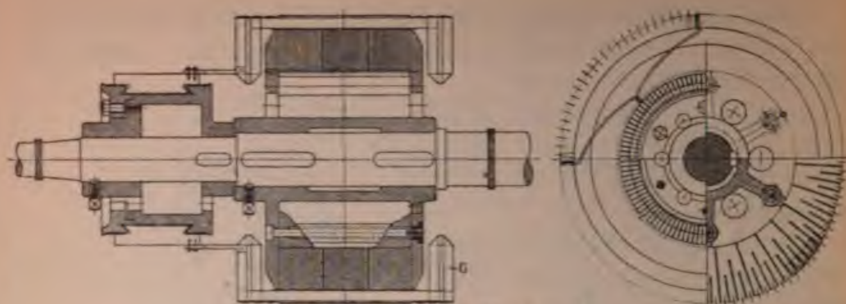


Fig. 215, General Electr. Co.

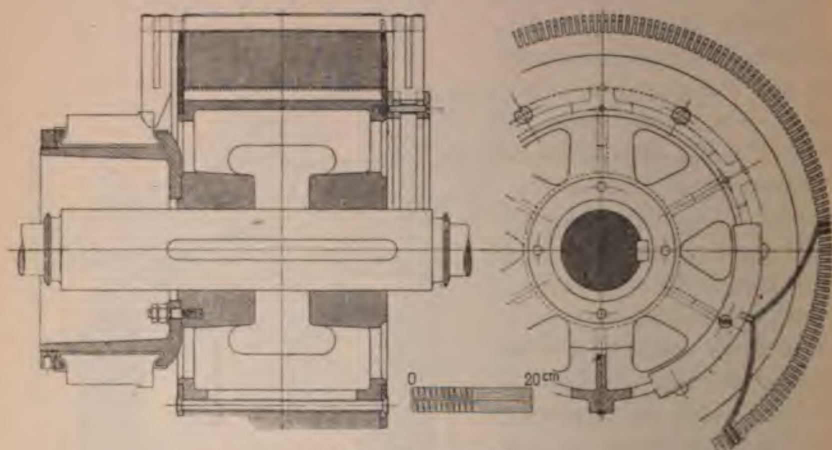


Fig. 216, Alioth.

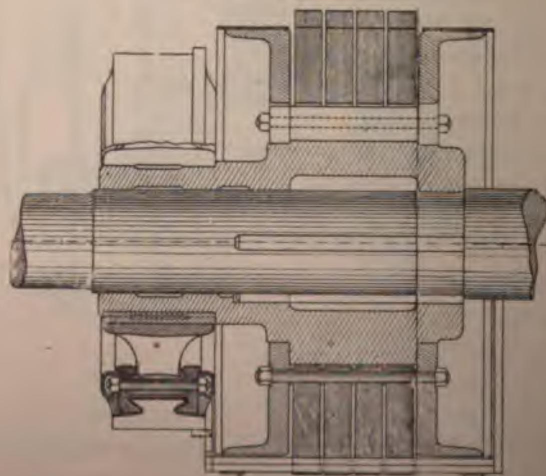
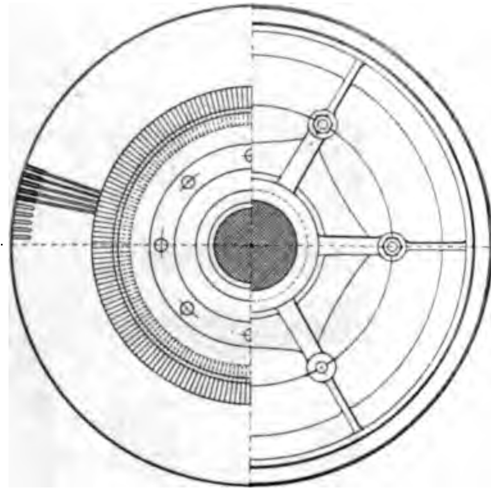


Fig. 217, General Electr. Co

[redacted]

Auch bedingt dies einen grossen Abfall an Blech, doch wird derselbe anderseits durch den Wegfall des Sternes und die geringeren Arbeitskosten reichlich aufgewogen. Für mittelgrosse Maschinen benutzt Oerlikon eine Konstruktion, die in Fig. 214 wiedergegeben ist. Der Armaturstern hat sechs Arme, welche abwechslungsweise ineinander greifen. Auf die Wicklung soll an einer späteren Stelle näher eingetreten werden.



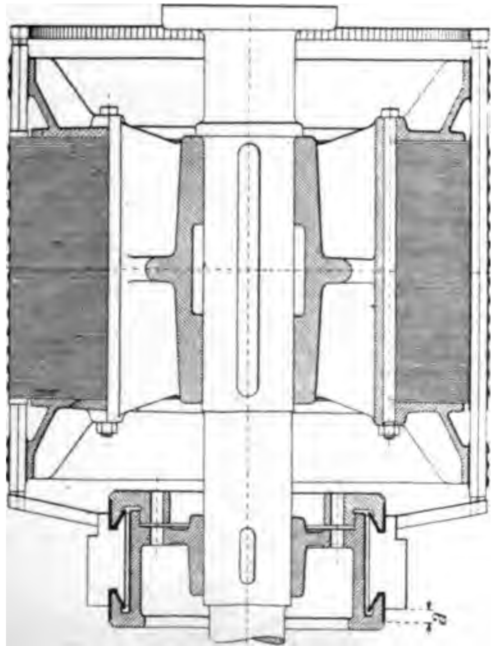


Fig. 218, Brown, Boveri & Cie.

Fig. 215 und 216 stellen ebenfalls zwei charakteristische Armatursterne dar, wovon der erstere von der General Electr. Co., der letztere von Alioth in Basel herrührt. Bei der Armatur von Alioth sind die Bleche wie bei Fig. 212 genietet; die Endscheiben sind zu diesem Zwecke aus dickem Eisenblech hergestellt. Die Armatur Fig. 215 besitzt ferner eine künstliche Ventilation, welche durch Einlage von zwei Messingscheiben mit Rippen erreicht wird. Es ist sehr zweifelhaft, ob diese Ventilation bei kleinen Maschinen genügend wirksam ist, dagegen mag sie bei grösseren Maschinen entschieden von Nutzen sein.

Wir kommen nun zu zwei weiteren Armaturen für Mantelwicklungen:

Fig. 217, Tramwaygenerator von H. F. Parshall, General Electr. Co.

Fig. 218, vielpolige Dynamo Brown, Boveri & Cie.

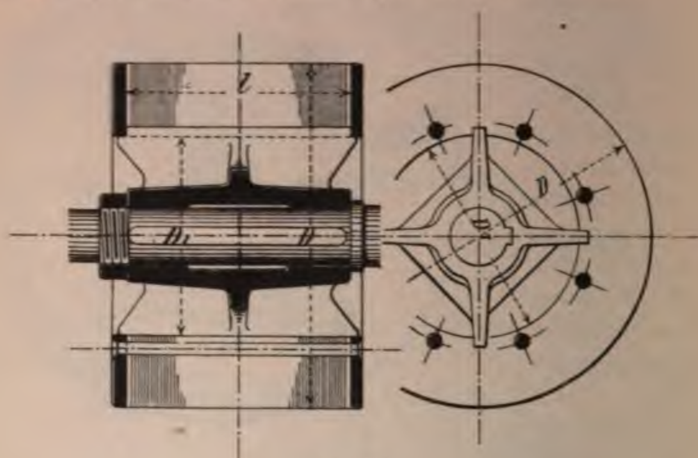


Fig. 219.

Die erstere dieser Maschinen besitzt ebenfalls künstliche Ventilation des Armaturkörpers. Besonders interessant ist sie noch durch die eigenartige und in jeder Beziehung vollkommene Oberflächenisolation des Kommutators.



Fig. 220.

Da die Bleche mit Lappen versehen sind, welche in die Gussarme des Sternes eingreifen, so fallen weitere Keile zum Mitnehmen weg.

Bei der Armatur für mehrpolige Maschinen von Brown dienen die Bolzen zum Zusammenhalten der Bleche gleichzeitig auch als Mitnehmer, indem sie halb in den Gussstern, halb in die Blechscheiben eingelassen sind.

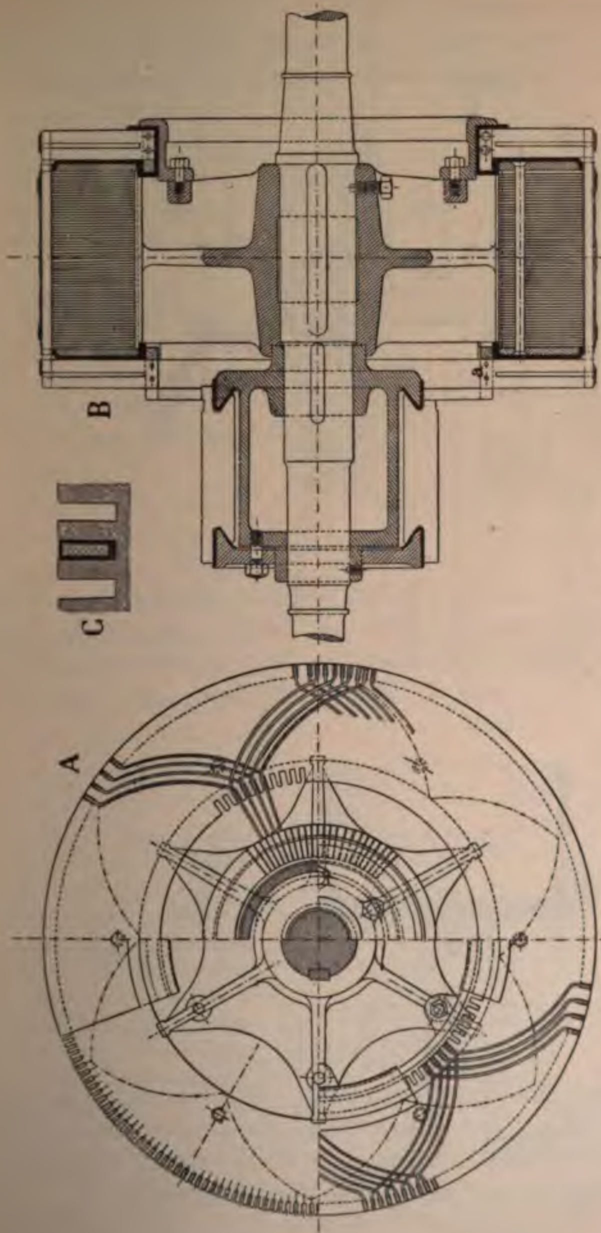


Fig. 221. Usine Jos. Farcot, 170 *KW* Armatur, entworfen vom Verfasser.

Die bisherigen Figuren beziehen sich in der Hauptsache auf Trommelarmaturen.[1])

Zum Schlusse seien noch vier Sternkonstruktionen, welche sich hauptsächlich für Ringdynamos eignen (Fig. 209—224), angeführt. Mit

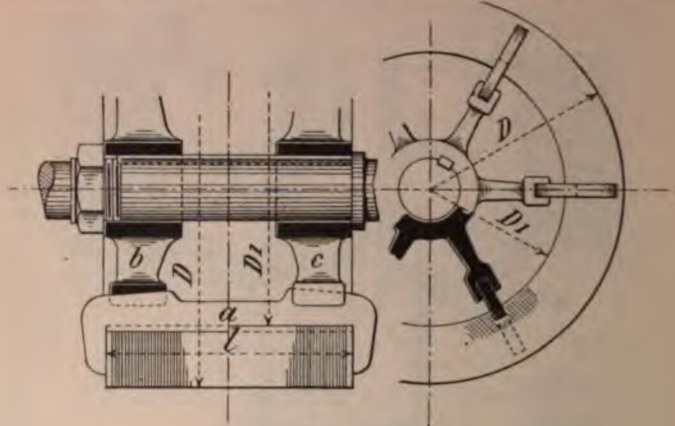


Fig. 222.

Ausnahmen derjenigen, Fig. 222 und 223, lassen sich die übrigen auch für Trommeln benutzen. Eine sehr einfache und billige Konstruktion ist z. B. diejenige des Verfassers Fig. 220 und 221 angewandt bei den Maschinen der Usine J. Farcot in Paris. Die letztere ist einer

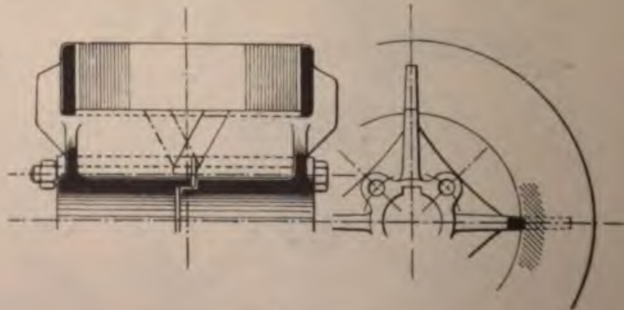


Fig. 223.

240 pferdigen Maschine entnommen. Um das Zusammenpressen zu erleichtern, müssen die Bolzen einige cm länger gelassen werden, als nötig; sie dienen in diesem Falle als Führung für die Bleche und werden nach dem Pressen auf die richtige Länge abgehauen.

---

[1]) Weitere Ansichten von sehr hübsch ausgeführten Armaturen finden sich in dem bereits zitierten Buche „Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen" von Prof. E. Arnold.

[redacted]

Sowohl bei dieser Konstruktion, als auch den zwei nachfolgenden, dienen die Arme gleichzeitig als Mitnehmer, da sie hierfür in das Blech eingelassen sind.

In neuerer Zeit wendet Brown für seine zweipolige Ringmaschinen eine ähnliche Konstruktion an, bei welcher die Arme ebenfalls in das Blech eingreifen.

Wie bereits betont wurde, müssen die Sterne von Ringmaschinen aus Bronze hergestellt werden, bei Trommeln ist Guss der geringeren Kosten halber vorzuziehen.

Im allgemeinen werden grössere Maschinen gewöhnlich mit Trommelwicklung ausgeführt, oder, wo Ringwicklung vorgeschrieben ist, macht man den Stern aus zwei Teilen, die Nabe nebst Armen aus Guss und den äussern Kranz aus Bronze. (Vergl. die Anordnung von Thury, Kap. IX).

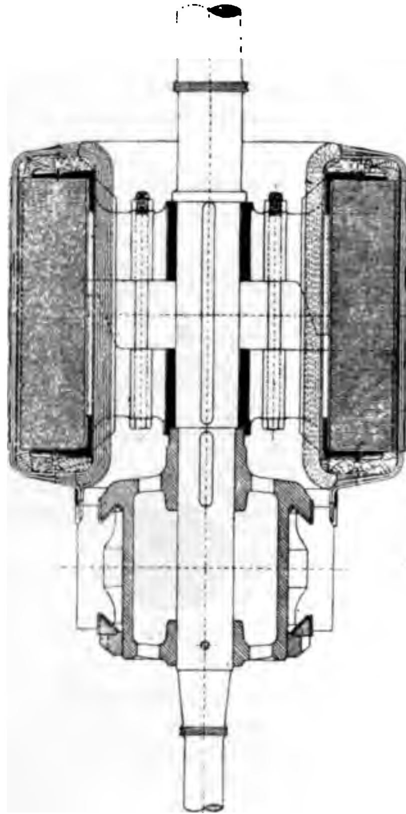
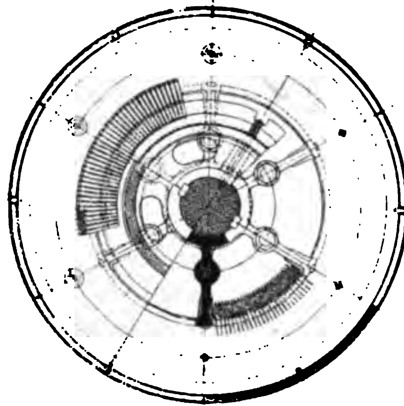


Fig. 224.



Anmerkung. Es mag hier der Platz sein, gegen ein altes Vorurteil, dass durchgehende Bolzen immer isoliert werden müssen, mit einigen Zahlen einzuschreiten[1]). Trotzdem es sich hier um Wechselströme handelt, lässt sich der Beweis, ohne dem naturgemässen Lehrgange allzusehr vorzugreifen, mit Leichtigkeit erbringen. Wir legen hierbei unserer Rechnung den ungünstigsten Fall zu Grunde, dass der Bolzen durch die Mitte des Eisenkernes gehe. Dies trifft beispielsweise bei den Maschinen von Siemens und Schuckert zu. Dreht sich die Armatur, so findet um die Bolzen ein Kreisen von Kraftlinien

[1]) Siehe Schweizerische Zeitschrift für Elektrotechnik vom 22. Febr. 1898.

statt, deren Richtung sich jeweilig ändert, wenn der Bolzen die Polmitte passiert. Die grösste Linienzahl wird für die Lage der Bolzen in der neutralen Zone erhalten. Es sei $\overline{\Phi}$ diese maximale Linienzahl, $\omega = \frac{n\,p}{60}$ die Anzahl Perioden und K ein Koeffizient, dessen absoluter Wert uns hier wenig interessiert.

Die mittlere E.M.K. der Bolzen ist dann

$$E = \omega \,.\, K \,.\, \overline{\Phi} \,.\, 10^{-8}.$$

Wäre die Bolzenzahl gleich der Anzahl Pole, so wird durch je zwei aufeinander folgende Bolzen ein geschlossener Stromkreis gebildet. Es entsteht folglich ein Wechselstrom, dessen Form ungefähr mit derjenigen der Spannungskurve übereinstimmt. Dieser Strom nun erzeugt seinerseits Kraftlinien, welche ihren Verlauf um die Bolzen nehmen, und deren momentane Zahl von der augenblicklichen Stromstärke abhängt. Wir bezeichnen mit $\overline{\varphi}$ die maximale Stärke eines solchen sekundären Feldes.

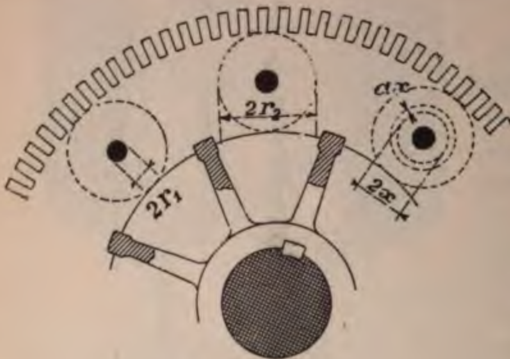


Fig. 225.

Nach den früher entwickelten Gesetzen erzeugt aber ein variables Feld, das um einen Leiter zirkuliert, in dem letzteren eine E.M.K., gleichbedeutend, ob die Variation durch die Veränderung der Lage des Leiters in einem Felde von konstanter Stärke, oder bei relativ gleich bleibender Lage des Drahtes zum Felde durch die Änderung der Kraftlinienintensität erfolgt. Wird das Feld durch den Strom im Leiter selbst hervorgerufen, so heissen wir die dadurch induzierte E.M.K. die E.M.K. der Selbstinduktion. Sie berechnet sich auf analoge Weise wie oben

$$E_s = \omega \,.\, K' \,.\, \overline{\varphi} \,.\, 10^{-8}.$$

Wird der Ohm'sche Widerstand des Leiters gegenüber der Selbstinduktion vernachlässigt, wie dies hier thatsächlich zutrifft, so wird

$$E_s = E$$

und da ferner K' approx. $= K$ gesetzt werden kann, folgt

$$\overline{\varphi} = \overline{\Phi}.$$

In dieser Gleichung ist $\overline{\Phi}$ im voraus gegeben; $\overline{\varphi}$ ist ferner eine Funktion der Stromstärke $\mathfrak{J}$, wir können also hieraus $\mathfrak{J}$ bestimmen, sobald wir das Abhängigkeitsverhältnis zwischen φ und $\mathfrak{J}$ kennen. i

Betrachten wir einen magnetischen Stromkres von der Länge L, auf welchen $\mathfrak{J}\,m$ Ampère-Windungen einwirken, so ist die Kraftlinienintensität sehr annähernd durch die empirische Formel

$$B = 21\,500 - \frac{19\,600}{\sqrt{H}}$$

[redacted]

bestimmt, hierin ist

$$H = \frac{4\pi \mathfrak{J} m}{10 \; L}.$$

Diese Formel stimmt, wie die nachstehende Tabelle zeigt, auf 1—2 % genau mit der am Schlusse des Buches enthaltenen Schmiedeeisenkurve überein und zwar für Sättigungen zwischen 4500—18400 Linien.

H	B nach Kurve	B berechnet	Fehler
1,5	4500	4400	− 2 %
2	6000	6000	—
5	10000	10100	+ 1
10	12300	12400	+ 0,8
30	15400	15200	− 1,3
70	17000	16750	− 1,2
140	18000	17730	− 1,5
300	18400	18580	+ 1

Für andere Schmiedeeisenkurven müssten eventuell die Konstanten etwas geändert werden.

Wir machen nun die für unseren Beweis ungünstige Voraussetzung, dass die Kraftlinien φ nur in der durch die Eisenhöhe als Durchmesser gebildeten Kreisfläche (Fig. 225) verlaufen, so ist, wenn $\mathfrak{J}$ für den mittleren Strom steht und $m = 1$ wird, die mittlere totale Kraftlinienzahl

$$\varphi = l \int_{r_1}^{r_2} \left(21\,500 - \frac{19\,600}{\sqrt[3]{\frac{4\pi}{10} \cdot \frac{\mathfrak{J}}{2\pi x}}} \right) dx = l \left[21\,500\,(r_2 - r_1) - \frac{25\,000}{\sqrt[3]{\mathfrak{J}}} \left(r_2^{\frac{4}{3}} - r_1^{\frac{4}{3}} \right) \right]$$

oder allgemein

$$\varphi = l \left[\alpha - \frac{\beta}{\sqrt[3]{\mathfrak{J}}} \right].$$

Nehmen wir an, der Strom verlaufe nach dem Sinusgesetze, so wäre die max. Stromstärke $= \sqrt{2}\,\mathfrak{J}$ und gleicherweise

$$\Phi = \sqrt{2} \cdot \varphi.$$

Folglich mittlere Stromstärke

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\beta l}{\alpha l - \Phi} \right)^3.$$

Tabelle der Werte von α und β.

		Werte von r_2								
$r_1 =$	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10
0,5 $\alpha =$	43000	53800	64500	75300	98000	118000	140000	—	—	—
0,5 $\beta =$	75000	98500	123000	149000	204000	263000	325000	—	—	—
0,75 $\alpha =$	—	48400	59000	70000	91500	113000	134000	156000	—	—
0,75 $\beta =$	—	91400	116000	142000	197000	256000	318000	386000	—	—
1 $\alpha =$	—	—	—	64500	86000	107500	129000	150000	172000	—
1 $\beta =$	—	—	—	134000	188000	247000	310000	376000	445000	—
1,25 $\alpha =$	—	—	—	—	80600	102000	124000	145000	167000	188000
1,25 $\beta =$	—	—	—	—	180000	239000	301000	370000	436000	506000

Gehen wir nun zu einem bestimmten Zahlenbeispiele über:
Die Daten einer 6poligen Maschine von 180 *KW* seien wie folgt:

Polbogen = 44 cm,
Luftsättigung = 7000,
r_2 = 9 cm,
r_1 = 1 cm,
Bolzenzahl = 6.
Widerstand eines Bolzens inkl. der Verbindung = 0,00016 Ohm.

Nach der obigen Tabelle wäre

$$\alpha = 172000,$$
$$\beta = 445000.$$

Ferner ist

$$\Phi = \frac{1}{4} \cdot 44 \,.\, 7000 \,.\, l = 77000 \,.\, l,$$

daher ist

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{445000 \,.\, l}{172000 \,.\, l - 77000\, l}\right)^3 = 74 \text{ Ampère.}$$

Wattverlust in den 6 Bolzen = 6 . 0,00016 . 74^2 = 5,2 Watt.

Wir sehen aus dieser Rechnung, dass es absolut keinen Zweck hätte, diese Bolzen an den Enden zu isolieren. Diese Notwendigkeit tritt überhaupt nur auf, wenn die Maschine ziemlich gesättigt ist.

5. Kommutator und Wicklung.

Kommutator. Bei ganz kleinen Maschinen begegnet man noch öfters Ausführungen, bei welchen die Kommutatorlamellen direkt auf die Welle montiert sind. Diese Konstruktion ist natürlich verwerflich, weil ein Auswechseln des Kommutators, nachdem derselbe einmal abgenutzt ist, beinahe zur Unmöglichkeit wird. Sämtliche neueren Maschinen besitzen daher abnehmbare Kommutatoren.

Die typischen Formen sind teilweise bereits in Verbindung mit der übrigen Armatur aufgeführt, weitere Anordnungen sind in Fig. 226 (Siemens und Halske) und 227 (Schuckert) ersichtlich. Dieselben unterscheiden sich von den ersteren dadurch, dass der Pressring aus mehreren Stücken besteht, welche einzeln ausgeschraubt werden. Der Kommutator Fig. 227 besitzt den Vorteil, dass die Lamellen, bevor sie auf die Büchse gebracht werden, gepresst und abgedreht werden können.

Bei sämtlichen Maschinen, bei welchen die Lamellen mittelst einer Mutter gepresst werden, darf die letztere nicht direkt auf die Lamellen, bezw. die Isolation drücken, sondern es ist eine Zwischenscheibe anzubringen, weil sonst die Isolation beim Anziehen verschoben und beschädigt würde. In solchen Fällen empfiehlt es sich auch, die Mutter mit Feingewinde zu versehen, um ein Lockerwerden zu verhüten, nicht zu vergessen eine Sicherheitsschraube, welche zweckmässigerweise so

[redacted]

angebracht wird, dass sie auch gleichzeitig eine allfällige Verschiebung der Kommutatorbüchse verhindert (Fig. 211 und 214).

Als Isolation zwischen den einzelnen Lamellen wird entweder indische Micca (die billigere kanadische Micca eignet sich ihrer Härte wegen nicht hierfür), Pressspahn, Fiber oder Asbest verwendet; die

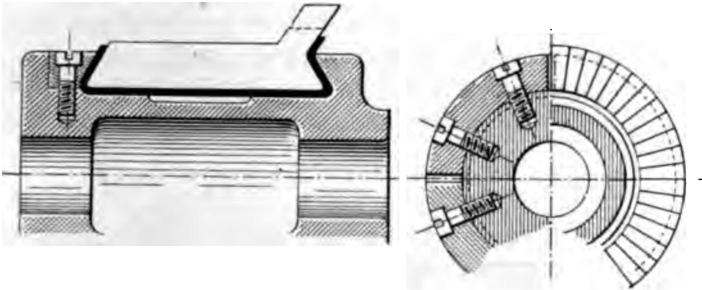


Fig. 226.

beiden letzteren sind indessen nur für trockene Räume zulässig. Für die Isolation der konischen Flächen empfiehlt sich Papier und Miccanittuch; solche speziell geformten Stücke werden übrigens auch fertig in Miccanit (mit Kopal- oder Schellack zusammengeleimten Micca-Abfällen) und gepresstem Karton geliefert. Dieselben sollten in diesem Falle nicht dicker als 2—3 mm gewählt werden, da sie sonst im Laufe der Zeit ihre Form verändern.

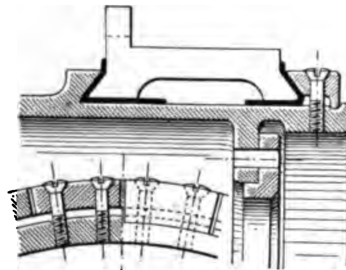


Fig. 227.

In neuerer Zeit wird auch zwischen Lamellen Miccanit verwendet, doch erfordert dies gewisse Vorsichtsmassregeln — der Kommutator muss während dem Anziehen erwärmt werden — damit er nicht bald unrund läuft. Miccanit hat gegenüber reiner Micca den grossen Vorteil der Billigkeit, sofern es sich um grössere Lamellen handelt. Bei kleineren Maschinen unter 10 HP ist der Unterschied allerdings kaum merklich und ist reine Micca vorzuziehen.

Besonderen Wert ist auf eine genügende Oberflächenisolation zwischen Lamellen und Büchse zu legen. Die Isolation soll daher — insbesondere bei höheren Spannungen — um ein gewisses Stück *a* (Fig. 218) = 5—10 mm über die Lamellen herausstehen. Eine ausgezeichnete Oberflächenisolation ist bei dem bereits erwähnten Tramwaygenerator von Parshall erreicht (Fig. 217).

Um die Bürstenzahl zu vermindern, werden zuweilen die ge überliegenden Lamellen mit einander verbunden (Seite 121). Es jedoch davon abzuraten, diese Kreuzverbindungen (Engl. Cr connections, franz. developpants) im Innern des Kommutators zubringen; vorzuziehen ist die in Fig. 228 veranschaulichte Anordn (Oerlikon).

Der Winkel a, den die Lamellen mit der Axe einnehmen (Fig. 2 variiert zwischen 40—50°, am vorteilhaftesten und für das Aufzeich auch am bequemsten ist ein Winkel von 45°. Die Büchse wird info dieser abgeschieften Form der Lamellen auf Zug beansprucht und zw

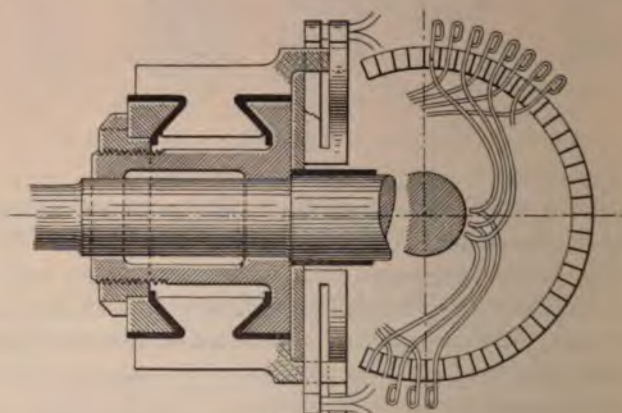


Fig. 228.

kann der axiale Zug, in kg ausgedrückt, mittelst nachstehender For erhalten werden

$$Z = \frac{tg\,a}{2} \cdot \frac{G\ v^2}{9{,}81\ r} \cdot 100. \tag{159}$$

G = Gewicht der Lamellen.
v = Geschwindigkeit in m.
r = Radius des Schwerpunktes der Lamellen in cm.

Brüche des Kommutators finden gewöhnlich an der Stelle c (Fig. statt und haben in 99 von 100 Fällen ihren Grund in Gussfeh Um daher sicher zu gehen, sollte der schraffierte konische Teil v gegossen und erst nachträglich abgedreht werden; das gleiche auch vom Armaturstern Fig. 230.

Als besondere Konstruktionsregeln, welche beim Entwurfe Kommutatoren im Auge behalten werden müssen, seien bemerkt:

a) Als Lamellenmaterial ist bei Kupferbürsten harte, homo und stark kupferhaltige Bronze mit Pressspahn- oder Miccaisola

für Kohlen- oder Messingbürsten hart gezogenes Kupfer mit Miccaisolation zu verwenden. In Amerika werden die Segmente gewöhnlich im Gesenke geschmiedet (Eurekalamellen).

b) Bei Hochspannungs-Seriemaschinen sollte die Spannung zwischen zwei Segmenten

$$e_2 = \frac{E\,2p}{N_2} < 30 \text{ Volt sein.}$$

c) Isolation zwischen 2 Lamellen

bei Spannungen bis 250 Volt = 0,5—0,6 mm
„ „ „ 500 „ = 0,7—0,8 „ „
„ „ „ 1000 „ = 0,8—1 „ „
„ „ „ 2000 „ = 1 —1,2 „ „

d) Die Länge des Kommutators hängt von der Bürstenauflagfläche ab, nicht zu verwechseln mit Bürstenquerschnitt. Im allgemeinen rechnet man für Metallbürsten 4 mm² pro Ampère, geht aber bei kleinen Maschinen noch viel weiter.

Für gute Ausführungen ist ungefähr im Mittel

(160) Auflagfläche in cm²

$$= \frac{4000}{E\left(\frac{400\,p_1}{J} + 1{,}2\right)}$$

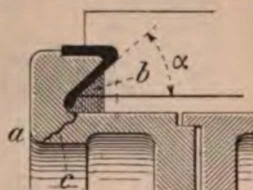


Fig. 229.

Für Kohlenbürsten sind 12 — 15 mm² pro Amp. als Minimum erforderlich; ist man im Platz nicht sehr beengt, so nehme man 20—25 mm², insbesondere bei Maschinen für niedrige Spannung, da sich sonst leicht ein Spannungsverlust von 1—1,5 % ergiebt. Man sollte übrigens nie versäumen, den Übergangsverlust an Hand der Gl. (143) S. 230 zu kontrollieren. Bezüglich des spec. Kontaktwiderstandes siehe S. 210.

e) Der Kommutator muss so gezeichnet werden, dass die Lamellen möglichst vollständigst abgenutzt werden können, ohne dass ein Auseinanderfliegen zu befürchten ist.

Wicklung. Grammewicklungen werden zumeist nur auf glatte Armaturen angewandt. Fig. 230 zeigt einige Details der von Oerlikon benutzten Anordnung. Statt den Holzscheiben sind auch andere Isolationsmaterialien im Gebrauch, wie Tuch, Miccatuch, Papier, Isolit u. s. w., welche vielleicht den Vorteil geringeren Platzbedarfes bei gleicher Isolationsfähigkeit besitzen.

Um eine nette Wicklung zu erreichen und die Enden nach aussen zu erhalten, sollte die Wicklung in der Mitte angefangen werden.

Weitaus mannigfaltiger sind die Trommelwicklungen, welche sich in 3 Gruppen einteilen lassen:

1. Knäuelwicklungen, Fig. 211,
2. Regelmässige Seitenwicklungen, Fig. 211, 214—146, 221,
3. Mantelwicklungen, Fig. 217 und 218.

Die erstere Wicklungsart findet sich nur bei kleinen Maschinen mit Drähten vor und sie bedarf einer sehr guten Isolation der sich kreuzenden Drähte. Bei der regelmässigen Seitenwicklung, die sich sowohl für Drähte als Stäbe eignet, sind verschiedene Ausführungen vorhanden. Es können z. B. nach Art der General Electr. Co. für die Wicklung gerade Stäbe benutzt werden, welche mittelst einer besonderen Zange umgebogen werden (Fig. 215), eine Konstruktion, welche,

Fig. 230.

beiläuft bemerkt, auch schon längere Zeit bei der Maschinenfabrik Oerlikon im Gebrauch ist, mit dem Unterschiede, dass hier der Längsstab an beiden Enden so umgebogen wird, dass dieselben je einen Schenkel der Verbindungsgabeln bilden[1]) (Fig. 214). Die Verbindung zweier Gabeln unter sich geschieht mittelst einer Kupferblechrille, in welche die Enden eingelötet werden. Zu bemerken ist, dass zur Verbindung dieser Rillen mit dem Kommutator noch ein besonderes Kupferblech benutzt wird, das bei allfälliger Reparatur einzeln losgelötet werden kann, eine Verbesserung, die nicht unterschätzt werden darf.

Fig. 216 zeigt eine Tramarmatur von Alioth in Basel, bei welcher die beiden Gabeln aus einem Stücke sind.

Bei der vom Verfasser entworfenen Konstruktion Fig. 221 sind die Gabeln auf der inneren Seite mit Ansätzen *a* versehen, welche auf einen Isolitring drücken und die Gabeln gegen die Wirkung der Centrifugalkraft schützen. Diese Anordnung hat sich auch besonders

---

[1]) Siehe auch Konstruktion des Verfassers Fig. 269 *a* bis *d*.

auf der Kommutatorseite sehr vorteilhaft bewährt, indem die Kommutatorsegmente auf diese Weise vollständig entlastet sind.

Sehr einfach in ihrer Herstellungsweise sind die sogenannten Mantelwicklungen, welche meines Wissens zuerst von C. E. L. Brown ausgeführt wurden.

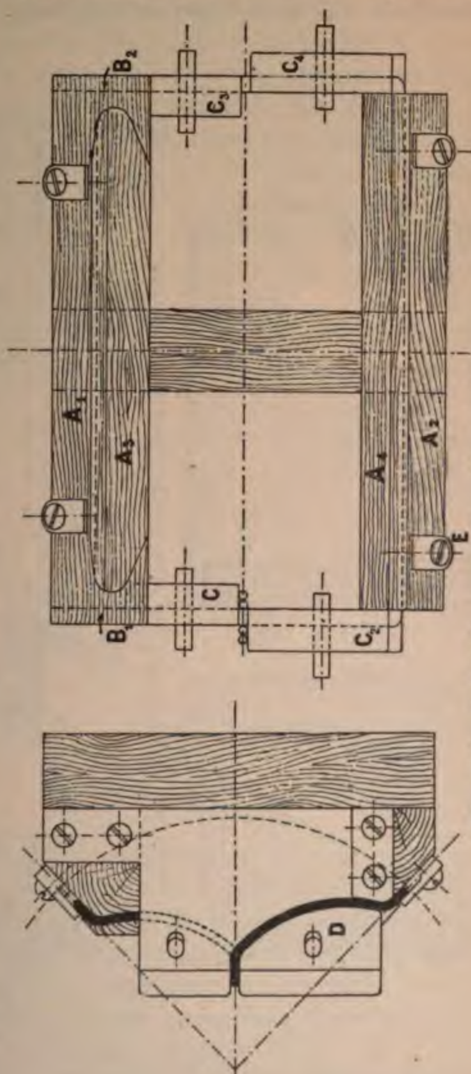


Fig. 231. Schablone für Parallelwicklungen.

Wie aus Fig. 217 und 218 ersichtlich, fallen spezielle Gabeln weg; der Hauptnachteil, welcher den Mantelwicklungen vorgeworfen werden kann, ist die grosse axiale Länge, besonders für Maschinen mit wenig Polen.

Sämtliche regelmässigen Drahtwicklungen lassen sich mittelst Schablonen — zuerst von Alioth in Basel (1885) und Eickemeyer in Yonkers (N.-Y.) (1888) angegeben — ausführen. Eine solche Schablone für zweipolige Maschinen oder vierpolige Maschinen mit Parallelschaltung ist in Fig. 231 dargestellt.

Dieselbe besteht aus 2 Holzleisten A_1 und A_2 mit Führungsleisten A_3 und A_4, welche durch Eisenplatten B_1 und B_2 und durch eine Holztraverse in der Mitte gehalten sind. An den Eisenplatten B_1 und B_2 sind ferner abnehmbare Formstücke C_1, C_2, C_3 und C_4 angebracht. Der Draht wird nun über den Platten B abgekröpft und unter den Formstücken C durchgezogen und längs den Leisten A_3 und A_4 gelegt. Die Riegel E dienen hierbei zur Befestigung des Drahtes. Um die fertige Wicklung herauszunehmen, müssen die Formstücke C entfernt werden.

Fig. 232—234 stellen einige weitere Schablonen dar:

Fig. 232 ist eine **Schablone für Seriewicklung**; der Draht ist punktiert eingezeichnet. In vielen Fällen wird darauf verzichtet, die ganze Spule auf diese Weise herzustellen, sondern man biegt entweder

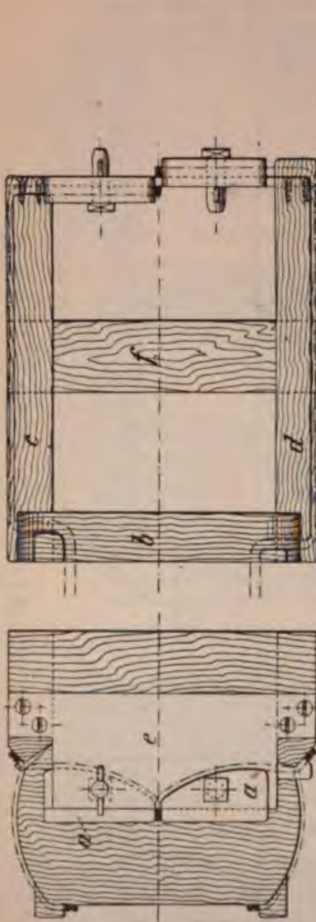


Fig. 232. Schablone für mehrpolige Seriewicklung.

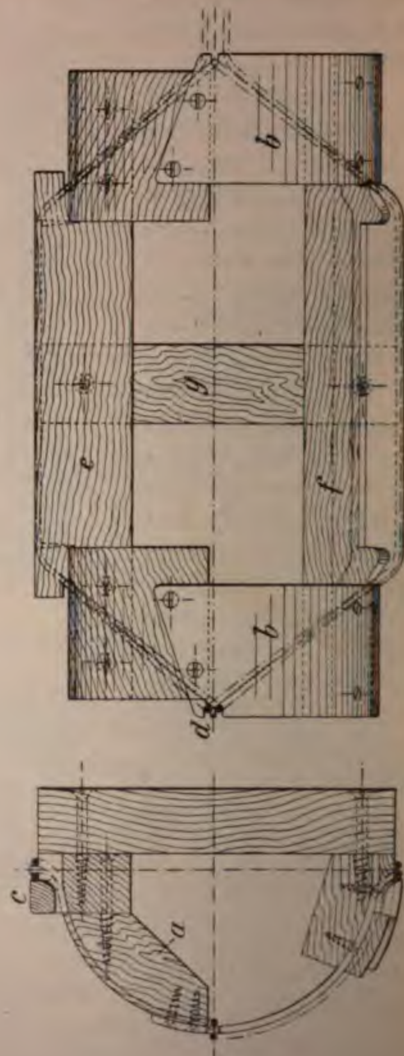


Fig. 233. Schablone für Mantelwicklungen.

die gegen den Kommutator liegenden seitlichen Drähte von Hand ab, oder, was manchmal vorzuziehen ist, man stellt nur den geraden Teil des Drahtes, sowie je einen der nach verschiedenen Seiten abgebogenen Schenkel der Gabel über einer Form her; die zweite Lage wird dann

ganz von Hand ausgeführt (212). Diese Arbeit kann durch Einlegen einer Holzscheibe *H* erleichtert werden.

Die Schablone Fig. 233 dient zur Herstellung von Mantelwicklungen und wurde bei der Fig. 268 *a* bis *d* veranschaulichten zweipoligen Maschine des **Verfassers** benutzt. Das Eigentümliche dieser Wicklung besteht darin, dass die Drähte einer Spule in zwei verschiedenen Nuten verteilt sind, um die Selbstinduktion zu verringern (siehe S. 235).

Fig. 234—235 illustrieren die Fabrikationsweise der **Westinghouse** Trammotoren. Diese Wicklung ist ein Mittelding zwischen Knäuelwicklung und regelmässiger Wicklung; jede Spule wird noch mit Band isoliert.

Die grossen Vorzüge der Schablonenwicklung

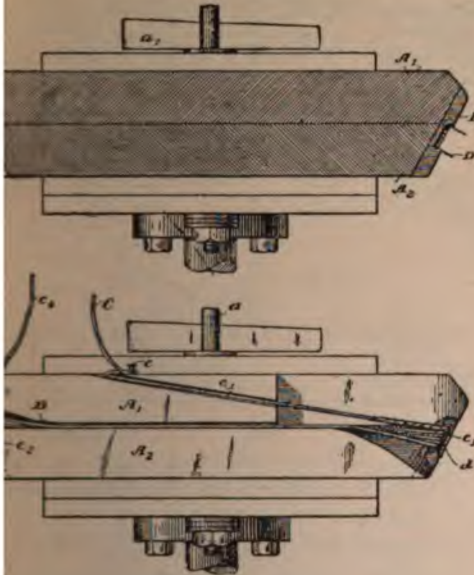


Fig. 234.



Fig. 235.

sind grosse Billigkeit und schnelle Herstellung, so wird behauptet, dass ein Westinghouse Trammotor von 30 PS (95 Nuten) in ca. 15 Stunden bewickelt werden kann, was durchaus nicht unwahrscheinlich ist; der Verfasser selbst hatte vor Jahren Gelegenheit, eine 80 PS Kraftübertragungsmaschine mittelst Schablonenwicklung zu bewickeln und bedurfte hierzu 40 Stunden (Spulen waren vorhanden), was einem routinierten Wickler offenbar in 30 Stunden gelungen wäre.

Bei Trommelwicklungen auf glatter Armatur sind sogenannte **Drivinghorns** (Mitnehmer), d. h. in die Armatur eingelassene dünne Messing- oder Fiberkeile unentbehrlich, weil die von den Bandagen herrührende Reibung allein keine genügende Sicherheit gegen ein Verschieben der Drähte gewährt.

Die **Isolation der Nuten-Armaturen** besteht entweder aus Papier,

Pergamentpapier, Micca, Miccanit oder Tuch mit Miccaeinlage u. s. w.[1]) Es mögen hier einige Versuchsdaten über die Durchschlagsfähigkeit verschiedener Isoliermaterialien mit Wechselstrom Platz finden, nach Versuchen von Mr. Plumb (Sibley Journ., Juni 1895).

Dicke der Isolation in mm				Spannung in Volt, bei welcher die Isolation durchschlagen wurde
Ölpapier	Micca	Luft	Ölschicht	
—	—	—	0,28	400 Volt
—	—	0,76	0,76	2140 „
—	—	2,67	1,27	5190 „
—	—	3,43	1,90	6280 „
—	—	3,94	2,54	6980 „
0,466	—	—	—	10400 „
—	—	7,26	3,80	11200 „
—	—	9,80	5,08	13300 „
—	0,216	—	—	16900 „
—	—	—	10,30	43000 „

Nach andern Versuchen der Maschinenfabrik Oerlikon ergab lich folgende Versuchsreihe:

Material	Dicke mm	Volt	Anmerkung
Corde Bulle Nr. 1779 . . .	0,0375	180—270	Blechscheibenisol.
Weiss.Pergamentp.(hitzbeständig)	0,0915	720—810	
Isolierpapier 241 (weiss) . .	0,11	1220	
Cellulosepapier (bräunlich) . .	0,10	1350—1530	Magnetspul. und Armaturkörper.
Doppelt geöltes Papier . . .	—	1800—2000	Kopfisolation für Knäuelwicklung
Miccanitpapier (2 Plättchen Seidenpapier mit Miccaeinlage)	0,1—0,16	2000—2400	Nutenisolation.

Man rechnet im Mittel, dass eine Miccanitscheibe von 0,1 mm bei 7000 Volt durchschlagen wird.

Die Verbindung der Wicklung mit dem Kommutator geschieht entweder durch Verlöten oder Verschrauben, wovon die erstere Methode jedenfalls den Vorzug verdient. Es sei hierüber auf die bereits angeführten Figuren, sowie Zeichnung 236 verwiesen. Ist die

[1]) Dieselbe erfolgt ausschliesslich mit Rücksicht auf die Isolation, da bei Zackenarmaturen sozusagen keine Zugkraft auf die Wicklung ausgeübt wird.

Armatur mit Draht bewickelt, so ist es am einfachsten, die Drähte direkt in die Lamellen einzulöten; ist dies wegen der Dicke des Drahtes nicht möglich, so mag die Anordnung Fig. 236 *a* angewandt werden. Dieselbe ist auch stets bei gezogenen Kupferlamellen von Vorteil, weil sie den geringsten Materialabfall bedingt.

Fig. 228 stellt einen Kommutator mit Kreuzverbindungen nach dem Muster von Oerlikon dar. Es sei zum Schlusse noch auf die Armatur der Maschine Fig. 256 *a* und *b* verwiesen, welche mit einer

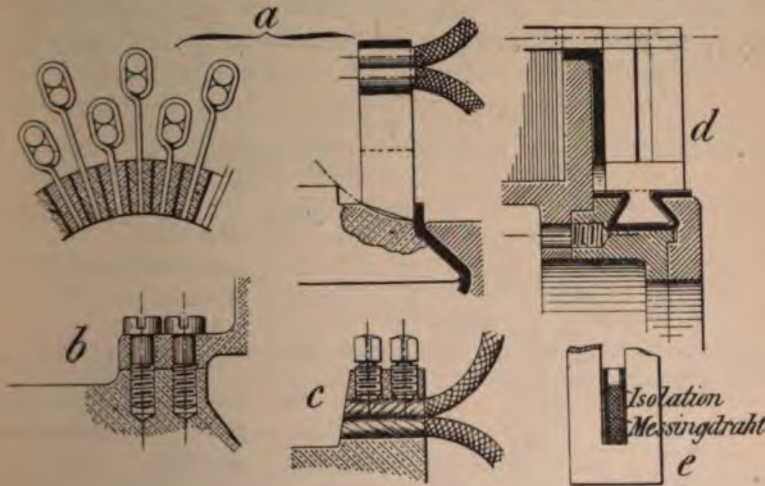


Fig. 236.

Tuchverkleidung zum Schutze gegen Staub versehen ist. Bei Kohlenbürsten ist diese wohl kaum notwendig, ferner ist im allgemeinen davon abzuraten, dieselben auf der Riemenscheibenseite anzubringen, oder, wo dies aus bestimmten Gründen erfolgen muss, sollten in dem Tuche einige Öffnungen angebracht werden. Es liess sich nämlich in einigen Fällen konstatieren, dass Kurzschlüsse nur dadurch hervorgerufen wurden, dass sich die in der Armatur beim Erkalten gebildete Feuchtigkeit beim Ingangsetzen gegen den Umfang hinzog und die Isolation an dieser Stelle gefährdete.

6. Bandagen und Hilfskollektoren.

Die Bandagen dienen zum Halten der Wicklung gegen die Wirkung der Centrifugalkraft. Um dieselbe zu berechnen, denken wir uns die Wicklung als einen Cylindermantel von der Länge $\mathfrak{L}$ (cm), der Dicke a (cm) und dem Radius $r = \frac{D}{2}$ hergestellt. Diesen Cylinder-

mantel zerlegen wir in unendlich kleine Stücke von der Länge λ (cm) und berechnen für ein einzelnes Segment die Centrifugalkraft P

$$P = \frac{\text{Gewicht}}{9{,}81} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot 100 = \gamma \cdot \mathfrak{Q} \cdot \lambda \cdot a \frac{v^2}{r} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{9{,}81}$$

γ = spezifisches Gewicht,

$$P_1 = P \cdot \cos \alpha = P \frac{x}{\lambda}.$$

Der auf den Bandagen-Querschnitt wirkende Zug ist hieraus

$$P_1 + P_1' + P_1'' + \ldots = \gamma\, \lambda \cdot \mathfrak{Q} \cdot a \left(\frac{x'}{\lambda} + \frac{x''}{\lambda} + \frac{x'''}{\lambda} + \ldots \right) \frac{v^2}{10 \cdot 9{,}81\, r}$$

$$= \gamma \frac{\mathfrak{Q} \cdot a v^2}{10 \cdot 9{,}81}.$$

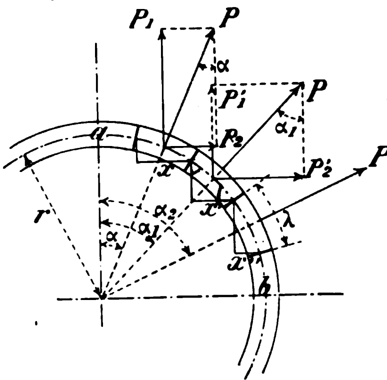


Fig. 237.

In dieser Gleichung kann

a durch $\frac{N \cdot s}{D \pi} \frac{1}{100}$, worin s gleich Querschnitt eines Drahtes in ~~cm²~~ mm²

$v = \frac{D \pi n}{60} \frac{1}{100}$ und

γ = 9,2 (mit Berücksichtigung des Isolationsgewichtes)

ersetzt werden.

Es bleibt dann: Zugkraft auf dem Querschnitt sämtlicher Bandagen (einfach gerechnet)

(161) $$Z = N \cdot s \mathfrak{Q} \cdot D n^2 \frac{0{,}83}{10^{10}}.$$

Am schwierigsten ist wohl die Grösse $\mathfrak{Q}$ zu bestimmen, wofür natürlich nur derjenige Teil einzusetzen ist, welcher thatsächlich unter dem Einflusse der Centrifugalkraft steht und nicht durch irgendwelches Hülfsmittel, geschlossene Nuten oder dergl. entlastet ist.

Tabelle über Bruchbelastungen von Drähten.

(Nach Lazare Weiller, Hütte u. s. w.)

Messingdraht	50 kg per mm²
Bronzedraht	46 „
Doppelbronzedraht	80 „
Duranadraht	80 „
Deltametall	100 „

Siliciumbronze oder Type *c* (Laz. Weiller)	75—80	kg per mm²,
Hartkupfer	45	„
Bessemerstahldraht (blank)	65	„
Tiegelflussstahldraht	120	„
Pianosaitendraht	bis 200	„

Die oben abgeleiteten Formeln dürften hinreichen, um zu zeigen, wie ungefähr eine Bandage zu berechnen wäre. In der Praxis nun kümmert man sich in der Regel wenig um solche Formeln, wie es überhaupt eine Regel des Elektrotechnikers ist, den elektrischen Teil der Maschine bis auf 4 Dezimalstellen zu berechnen, und das „bischen Mechanik" aus dem Handgelenk zu entwerfen, ob in diesem Falle mit Recht, werden wir gleich an einigen Beispielen sehen.

Beispiel 1. Wir wählen hierfür eine Maschine von 300 HP mit mässiger Umfangsgeschwindigkeit (Nutenarmatur).

$$n = 300,$$
$$\mathfrak{L} = 60 \text{ cm},$$
$$N = 490,$$
$$s = 30 \text{ mm}^2 \text{ und}$$
$$D = 115 \text{ cm}.$$

Hierbei sei vorausgesetzt, dass die Drähte auf den Stirnflächen gehalten seien, was thatsächlich nicht immer der Fall ist, $\mathfrak{L}$ ist somit ungefähr gleich der Armaturlänge.

Nach Gleichung (161) ist somit

$$Z = N \,.\, s\mathfrak{L} \,.\, Dn^2 \frac{0{,}83}{10^{10}} = \frac{490 \,.\, 30 \,.\, 60 \,.\, 115 \,.\, 90000 \,.\, 0{,}83}{10^{10}} = 756 \text{ kg}.$$

Für die Länge von 60 cm mögen versuchsweise 5 Bandagen à 20 mm Breite aus Duranadraht à 1,5 mm Durchmesser (Querschnitt 1,75) vorgesehen werden.

$$\text{Querschnitt sämtlicher Drähte} = 5 \,.\, \frac{20}{1} \cdot 1{,}75 = 116 \text{ mm}^2.$$

$$\text{Bruchfestigkeit} = 116 \,.\, 46 = 5430 \text{ kg}.$$

Wir besitzen also nur eine ca. 7fache Sicherheit, während man bei sonstigen Konstruktionsteilen im allgemeinen eine grössere Sicherheit fordert und dabei ist noch gar nicht berücksichtigt, dass das Gewicht der Drähte auf den Stirnflächen eigentlich hinzuzurechnen ist.

Es wird sich daher empfehlen, einen Siliciumbronze- oder Stahldraht zu benutzen.

Beispiel 2. Für eine Maschine von ca. 15 *KW* ist:

$$N = 340,$$
$$s = 9,$$
$$\mathfrak{L} = 25,$$
$$D = 30,$$
$$n = 1000.$$

Die Maschine ist mit Knäuelwicklung ausgeführt.

$$\text{Folglich } Z = \frac{340 \,.\, 9 \,.\, 25 \,.\, 30 \,.\, 1000000 \,.\, 0{,}83}{10^{10}} = 190 \text{ kg}.$$

Nehmen wir hierfür 4 Bandagen à 20 mm Breite mit 1 mm Draht (Sektion = 0,78) an, so ist die Bruchfestigkeit für Bronzedraht gleich

$$4 \cdot \frac{20}{1} \cdot 0{,}78 \,.\, 46 = 2870 \text{ kg}.$$

Wir besitzen also eine 15fache Sicherheit.

Beispiel 3. Zum Schluss mag noch ein Beispiel erwähnt werden, bei welchem thatsächlich die Bandagen zu schwach waren. Dasselbe bezieht sich auf eine Maschine von 240 HP bei 350 Touren. Die Daten derselben sind folgende:

$$D = 122 \text{ cm}, \quad N = 228, \quad s = 100 \text{ mm}^2.$$

$\mathfrak{L}$ mag mit Berücksichtigung der seitlichen Verbindungen zu 75 cm gesetzt werden; folglich ist nach Gleichung (161)

$$Z = \frac{228 \,.\, 100 \,.\, 75 \,.\, 122 \,.\, 350^2 \,.\, 0{,}83}{10^{10}} = 2140 \text{ kg}.$$

Die Armatur war mit 4 Bandagen à 18 Drähten von 1,5 mm aus Siliciumbronze versehen. Beim Betriebe trat eine seitliche Verschiebung der Bandagen ein und zwar so, dass dieselben aus der eingedrehten Nute heraustraten und auf das Eisen zu liegen kamen. Es mag noch bemerkt werden, dass der Durchmesser der Bandage unter den Bronzedraht gemessen, ca. 2 mm kleiner als der Eisendurchmesser war.

Wir bestimmen also die durch den obigen Zug verursachte Verstreckung.

Der Querschnitt sämtlicher Bandagen ist gleich:

$$4 \,.\, 18 \cdot \frac{1{,}5^2 \pi}{4} = 127 \text{ mm}^2,$$

was einer Belastung von

$$\frac{2140}{127} = 16{,}9 \text{ kg pro mm}^2$$

entspricht.

Nehmen wir das Elastizitätsmodul $E = 9000$ an; leider enthält die einschlägige Fachlitteratur keine genaueren Angaben über diese Grösse. Hieraus ergäbe sich eine Verstreckung

$$\triangle \mathfrak{L} = \mathfrak{L} \,.\, \frac{Z}{E} = 122\,\pi \cdot \frac{16{,}9}{9000} = 7{,}2 \text{ mm},$$

oder auf den Durchmesser bezogen

$$\text{Radiale Verstreckung} = \frac{7{,}2}{\pi} = \text{rund } 2{,}3 \text{ mm}.$$

Wir sehen also, dass diese Erscheinung notwendigerweise eintreffen musste. Übrigens konnte diesem Umstande leicht dadurch abgeholfen werden, dass man die Zahl der Bandagen auf 6 erhöhte und den Bronzedraht durch Piano-Stahldraht ersetzte, der sich überhaupt sehr gut für Bandagen eignet; vorausgesetzt dass er stark genug gespannt und beim Verlöten gehörig gehalten wird, da er sich sonst leicht streckt.

Es mag hier die Bemerkung von Nutzen sein, dass bei Verwendung von Stahldraht zum Löten Säure angewendet werden muss. Infolgedessen muss die Lötstelle nachträglich sorgfältig mit Benzin gereinigt werden und ist überhaupt darauf zu achten, dass keine Säure in die Wicklung dringt.

Die drei Beispiele, welche beliebig vermehrt werden können, mögen genügen, um zu zeigen, dass man in der Wahl des Drahtmateriales äusserst sorgfältig verfahren muss, und dass eine kleine Kontrollrec

ng manchmal nichts schaden kann. Je grösser die Maschine, um eher ist diese Vorsicht geboten; in vielen Fällen wird man dann zu gelangen, für die Stirnwicklungen einen besonderen Hilfskollektor ehe Fig. 236, *d*) anzuwenden. Ein sehr gutes Besultat kann auch it der Anordnung Fig. 236, *e* erreicht werden, welche verhältnismässig ichter und billiger herzustellen ist.

Bei der vom Verf. benutzten Konstruktion (Usine J. Farcot) Fig. 221, nd die Gabeln an der Abkröpfungsstelle mit einer Verlängerung versehen, odurch ein Herausfliegen verhindert wird. Auf der Seite des Kommutors hat diese Konstruktion noch den speziellen Zweck, den Kommutator i entlasten, um ein Unrundlaufen infolge Einwirkung der Centrifugalraft zu vermeiden.

Zum Schlusse mögen noch einige Regeln über die Herstellung der andagen von Nutzen sein, obohl man diese Arbeit für geöhnlich dem Gutfinden des 'icklers überlässt.



Fig. 238.

Fig. 238 zeigt ein sehr eleıntes Bandagenschloss der Mahinenfabrik Oerlikon. Als nterlage dient ein Tuchband, orüber ein Miccastreifen gelegt t. Das Kupferblech ist ca. 15—0,2 mm dick und an bein Enden mit Ösen versehen. In die eine davon wird der Anfang s Drahtes eingeführt und gehörig durch eine Schnur verankert, ährend man in die andere vorläufig ein Stück des nämlichen Drahtes eckt. Bevor nun die letzte Windung beendigt wird, verlötet man e Bandage an 5 oder 6 Stellen und zieht schliesslich noch das rahtende durch die freie Öse, worauf die Enden in der angegebenen 'eise umgebogen und das Schloss gehörig verlötet wird.

Es ist nicht ratsam, die Lötung ringsherum vorzunehmen, weil ch die Bandage sonst leicht infolge von Foucaultströmen erwärmen nd eventuell loslöten kann.

Aus dem gleichen Grunde sollten Bandagen von mehr als 20 mm reite 2 teilig mit ca. 2—3 mm Zwischenraum ausgeführt werden. eide Hälften können übrigens fortlaufend gewickelt werden, ohne iss der Draht an der Trennungsstelle abgeschnitten zu werden braucht.

7. Bürsten und Bürstenhalter.

Kleinere Motoren oder solche, die für Traktionszwecke bestimmt nd, haben gewöhnlich fixe Bürsten, bei grösseren Motoren dagegen, owie bei Generatoren, müssen dieselben verstellbar gemacht werden.

Unter allen Umständen jedoch müssen die Bürsten, um eine konische und rillenartige Abnutzung zu vermeiden, axial verstellbar angebracht werden, wobei es sich empfiehlt, nach dem Muster von Brown die von den Bürsten beschriebene Kommutatorlänge gegen die Armatur hin durch eine Rille abzugrenzen.

Die Konstruktion des Bürstenhalters zeigt im allgemeinen eine grosse Übereinstimmung.

Gewöhnlich werden die Bürstenhalter drehbar auf dem Lager befestigt, wobei der Hebel gleichzeitig mit einer Schraube zum Feststellen versehen ist. Nur bei sehr grossen Maschinen ist nach amerikanischem Muster ein besonderer, am Magnetgestelle angeschraubter Support mit Armen vorzuziehen, in welchem der Bürstenapparat drehbar angeordnet ist.

Mechanische Verschiebung mittelst Schnecken und Schneckenrädern hat den Vorteil einer exakten Bürsteneinstellung, ist jedoch bei einer Maschine von weniger als 50—60 *PS* und mit nicht zu nahen Polschuhen und entsprechend breiterer neutralen Zone entbehrlich.

Die gewöhnliche Art der Isolation der Bürstenstifte ist in der Fig, 239, *a* veranschaulicht und ist ohne weiteres verständlich.

Bei Spannungen über 100—150 Volt ist besonderes Gewicht auf eine gute Oberflächenisolation zu legen, die Scheiben müssen folglich 8—15 mm über den Gusshalter hervorragen.

Ein schwacher Punkt befindet sich ferner an der Trennungsstelle der Isolationshülsen, indem selbst dann, wenn sich die beiden Büchsen berühren, die Möglichkeit eines Durchschlagens nicht ausgeschlossen ist.

Diesem Übelstand ist bei den Konstruktionen *b* und *c* vorgebeugt. Eine sehr einfache Anordnung ist auch diejenige von Fig. 239, *d*. Sie besitzt den Vorteil, dass der Bürstenstift nach rückwärts herausgezogen werden kann und ist infolgedessen sehr bequem, wenn die Distanz zwischen Bürstenstift und Kommutator resp. Wicklung zu klein ist, um den Bürstenapparat auf jener Seite herausnehmen zu können. Aus dem nämlichen Grunde ist es nicht rätlich, die rechte Mutter in Fig. 239, *a* mit dem Bürstenstifte aus einem Stücke herzustellen. Fig. 239, *e* zeigt schliesslich eine von C. L. Brown häufig benutzte Konstruktion.

Einige Konstrukteure wenden Bürstenhalter an, bei welchen die Bürsten gleichzeitig mittelst isolierten Hebeln oder Zahnrad abgehoben werden können. Obwohl dadurch die Einrichtung des Bürstenhalters ziemlich kompliziert und verteuert wird, so hat dies seine grossen Vorteile, wenn beispielsweise die Dynamos durch Dampfmaschinen angetrieben werden, bei welchen im Momente des Anlassens ein Rückwärtsdrehen möglich ist.

Bei Kohlenbürsten ist man dieser Vorsicht enthoben.

Die Konstruktion des eigentlichen Bürstenapparates ist so mannigfaltig, dass es zu weit führen würde, die heutzutage vorkommenden, zum Teil exotischen Konstruktionen auch nur einigermassen

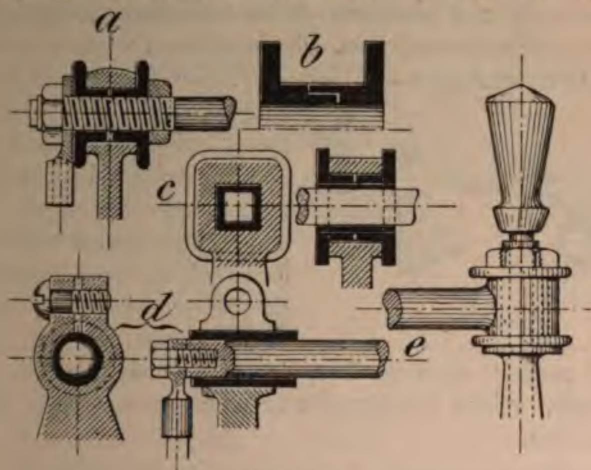


Fig. 239.

vollständig zu behandeln. Wir beschränken uns daher auf die wenigen, gleichsam als Urtypen dienenden guten Ausführungen.

Fig. 240 ist unstreitig die verbreiteste und einfachste Form, ein gutes Funktionieren ist jedoch an folgende nicht zu umgehende Bedingungen geknüpft:

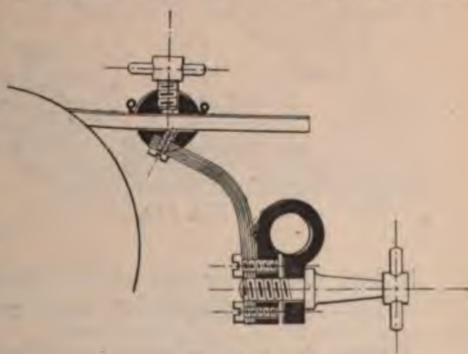


Fig. 240.

1. Die Feder muss aus gutleitendem und federndem Material, hart gewalztem Kupfer oder Messingblechen von 0,2 bis 0,3 mm hergestellt sein.
2. Der von dieser Feder gebildete Winkel darf nicht zu klein sein, weil sonst beim Andrücken eine Verschiebung der Bürsten nach vorwärts, oder auch ein Umkippen der letzteren um eine Kante eintritt.

Fig. 241 und 242, zwei Konstruktionen von Brown, wovon hauptsächlich die erste sehr gut durchgeführt ist, finden sich ebenfalls in unzähligen Varianten vor. Man könnte derselben vielleicht den Vorwurf machen, dass die Plattfeder etwas nahe an den Kommutator zu

liegen kommt. Sehr originell ist auch der Bürstenhalter von Alioth, Fig. 262.

In neuerer Zeit kommt man nach und nach etwas von den Metallbürsten ab und beschränkt deren Anwendung-mehr noch auf Maschinen mit grossen Stromstärken. Die praktische Verwendung der Kohlenbürsten datiert kaum seit 8—9 Jahren. Ursprünglich von Prof. G. Forbes vorgeschlagen, fanden Kohlenbürsten zuerst eine praktische Verwendung in Amerika, wo dieselben bei Tramwaymotoren, bei denen eine vor- und rückwärtsgehende Bewegung erforderlich ist, benutzt wurden. Wenn sie später wieder etwas in Misskredit kamen, so ist dies einzig nur dem Umstande zuzuschreiben, dass die Bedingungen zu wenig bekannt waren, welche zur Erreichung eines guten Ganges eingehalten werden müssen.

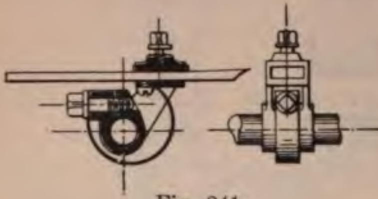


Fig. 241.

1. Müssen die Lamellen aus möglichst hartem und homogenen Kupfer hergestellt sein und es soll das Isolationsmaterial zwischen den Lamellen (zumeist Micca) nicht zu hart sein und sich gleichmässig mit den Lamellen abnutzen,
2. sind nur Kohlen aus möglichst gut leitendem, nicht zu trockenem, aber auch nicht sehr fettem Material geeignet.

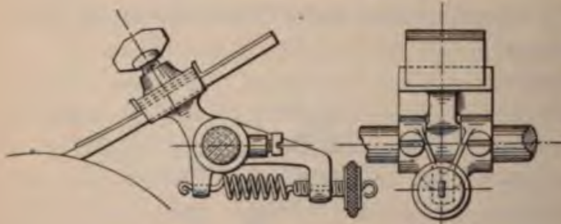


Fig. 242.

3. darf die Umfangsgeschwindigkeit nicht mehr als höchstens 10—11 m betragen soll, wenn möglich aber unter 8—9 m sein,
4. muss der Bürstenhalter möglichst leicht sein, um bei den nicht zu vermeidenden Unebenheiten des Kommutators nicht zu vibrieren. Besonders geeignet hierfür sind auch schief aufliegende Kohlenstücke.

Nichts ist wohl verhängnisvoller für das gute Funktionieren einer Maschine mit Kohlenbürsten, als wenn einzelne Lamellen des Kommutators lose werden und aus den übrigen heraustreten. Selbst die beste Maschine wird unter solchen Umständen feuern und das einfachste und einzige Mittel besteht oft darin, die Kohlenbürsten durch Metallbürsten zu

ersetzen, wenn es nicht gelingt, durch neues Anziehen und Abdrehen des Kommutators solchen Unzukömmlichkeiten dauernd vorzubeugen.

Die Figuren 243—245 repräsentieren drei amerikanische Formen:

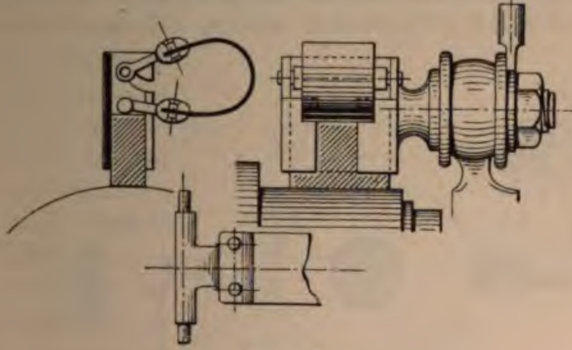


Fig. 243.

Fig. 243, Lundell,
Fig. 244, Westinghouse (für Tramgeneratoren),
Fig. 245, Wood.

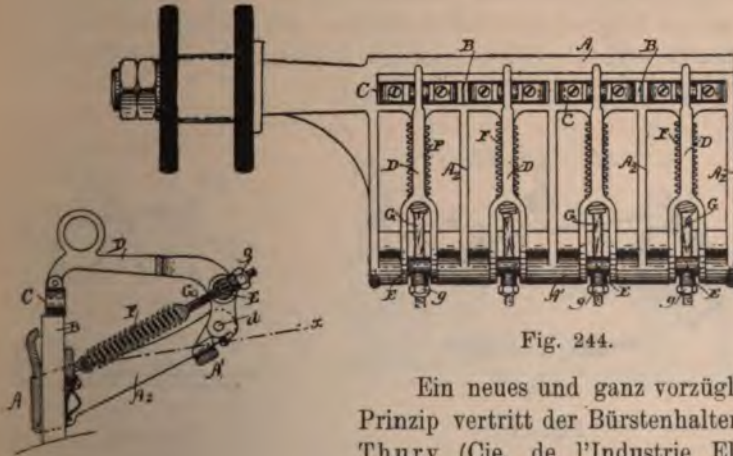


Fig. 244.

Ein neues und ganz vorzügliches Prinzip vertritt der Bürstenhalter von Thury (Cie. de l'Industrie Electr., Genève) Fig. 246. Statt nämlich die Bürstendimensionen je nach der Stromstärke zu ändern, adoptierte Thury einen stehenden Type von bestimmten Dimensionen, von welchem je nach der Stromstärke mehr oder weniger auf einen Stift montiert werden. Auf diese Weise wird nicht nur die Fabrikation bedeutend erleichtert (die Selbstkosten pro Bürstenhalter kommen auf kaum Fr. 2.20—2.50 zu stehen), sondern es wird auch ein gutes Aufliegen der Bürsten gesichert. Nicht ganz vorwurfsfrei ist die Stromableitung,

welche teils durch die seitlichen Scheiben aus galvanisiertem gestanztem Eisenblech, teils durch ein dünnes eingeklemmtes Kupferblech geschieht.

Die Verwendung von kleinen festgeklemmten Kohlenstücken statt grösserer loser Platten, welche in einem festangebrachten Halter vermittelst einer Feder vorgeschoben werden, hat den Vorteil grösserer

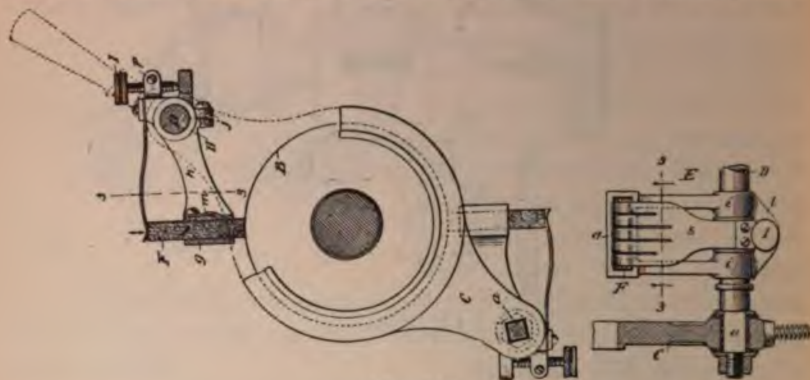


Fig. 245.

Solidität und geräuschlosen Ganges. Ferner kann wenigstens bei den drei soeben besprochenen Bürstenhaltern die Kommutatorlänge besser ausgenutzt werden. Dagegen ist die nutzbare Länge des Kohlenstückes verhältnismässig kleiner.

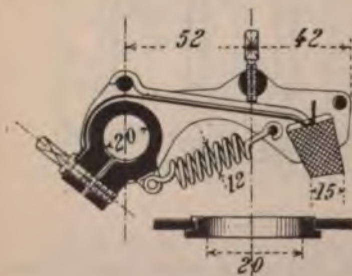


Fig. 246.

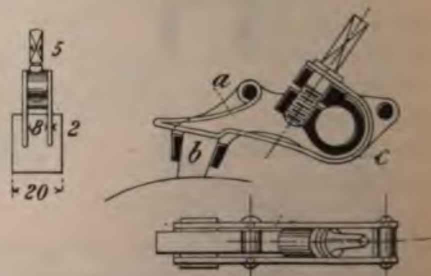


Fig. 247.

Bei dem Bürstenhalter der Maschinenfabrik Oerlikon Fig. 247 (nach dem Vorbilde Thury's entworfen) ist der Kontakt der Kohlenstücke mit den Scheiben etwas inniger, überdies bestehen die letzteren aus Kupfer. Die Plattfeder *ac* hat zwei Bestimmungen, das Stück *ab* dient zum Anpressen der Kohle an den Halter, während das Stück *bc* die Federung des Ganzen zu bewirken hat.

Auch hier ist sicherheitshalber unter die Plattfeder noch ein Kupferblech geklemmt.

[redacted]

Der Kohlenbürstenhalter Fig. 248 des Verfassers, der bei den Dynamomaschinen der Usine J. Farcot verwendet wird, ist auf das gleiche Prinzip gegründet. Die beiden Schilder aus Messingblech sind gestanzt und zur Verstärkung mit einer Ausbuchtung (embouture) versehen. Etwas verschieden ist hier die Form der Kohlenstücke, wodurch eine grössere Abnutzungslänge erreicht und die Möglichkeit einer Drehung beim Anziehen der Schrauben vermindert wird. Ferner hat es sich als nützlich erwiesen, die Schraube gegen ein Losdrehen zu sichern.

Eine neuere Konstruktion des Verfassers ist in Fig. 249 dargestellt. Der Kohlenhalter *a* und das Klemmstück *b* bestehen aus gezogenem Kupfer, die Feder *c* ist aus Lamellen von hartgewalztem Messing zusammengesetzt und bewirkt eine absolut parallele Verschiebung der Auflagfläche der Kohle, was nicht der Fall ist, wenn man die Feder nach unten abbiegt.

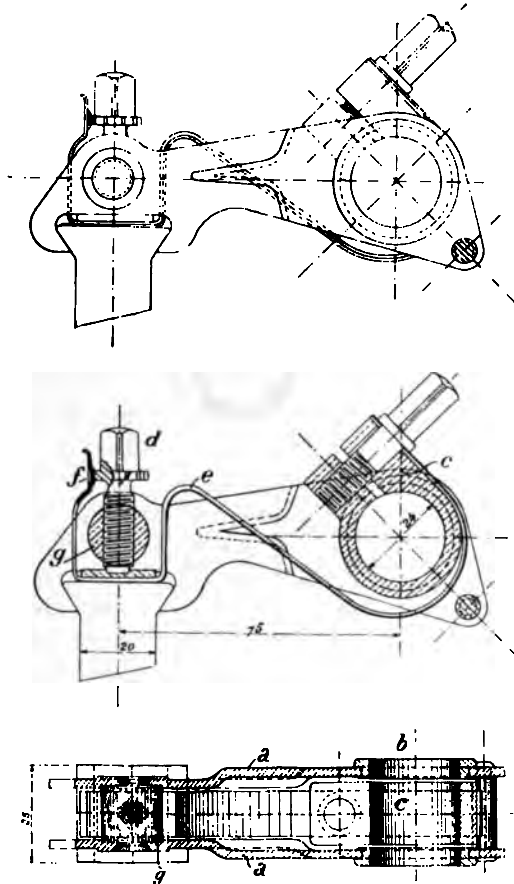


Fig. 248.

Beim Kohlenbürstenhalter Fig. 250*a* für ganz kleine Maschinen ist die Metallfeder durch ein Kautschukband (2) ersetzt.

Bemerkenswert ist auch die Klemmvorrichtung von Alioth für die Kohlenstücke (Fig. 250*b*) und diejenige von Siemens (Fig. 251), welche gegenwärtig sehr viel angewandt wird.

Bezüglich des Bürstenmateriales sei auf Seite 291 verwiesen. Der *Bürstendruck* mag zu ca. 100—150 gr pro cm² Auflagfläche an-

genommen werden, bei Tramwaymotoren dagegen ist dieser Druck bis auf 250 und 300 gr zu erhöhen.

Es gilt als Regel, nie weniger als 2 Bürsten pro Stift zu verwenden, um die eine davon abheben zu können, ohne dass dadurch der Strom unterbrochen wird.

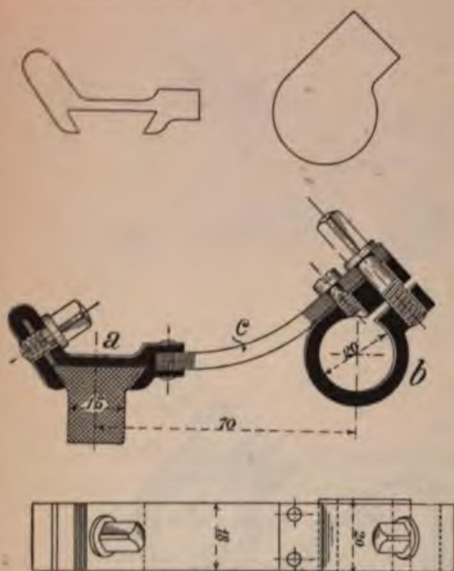


Fig. 249.

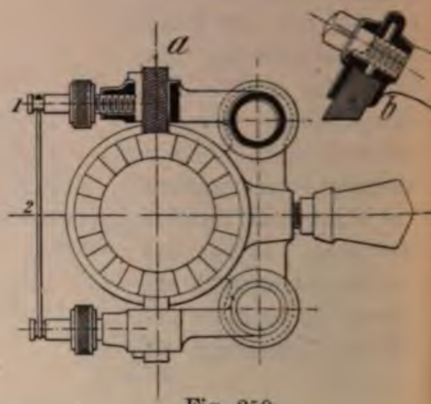


Fig. 250.

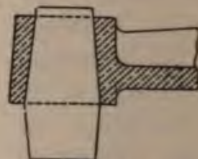


Fig. 251.

B. Die Magnete.

1. Magnetgestell.

Wenn es früher sozusagen zum guten Tone des Elektrotechnikers gehörte, neue Mechanismen für Bogenlampen zu entwerfen, so wird gegenwärtig, und zwar speziell in Amerika, das Erfinden von neuen Magnetanordnungen als eigentlicher „Sport" betrieben. Fast keine Woche vergeht, ohne dass wieder ein neuer Type auf dem Markte erscheint. In vielen Fällen mögen ja die neuen Formen vollständig durch den beabsichtigten Zweck der Maschine begründet sein, es ist jedoch nicht abzuleugnen, dass die Mehrzahl derselben seine Existenz lediglich dem Geschmacke verdankt. Wir verzichten deshalb auch auf eine Beschreibung der verschiedenen Magnetanordnungen. Tafel II enthält schematische Skizzen von 42 der am meisten vorkommenden charakteristischen Maschinen und ist auch ohne besondere Erklärung verständlich.

Neuere Maschinen werden sehr häufig aus Stahlguss hergestellt. Bei mobilen Motoren oder Maschinen, bei welchen die Gewichtsfrage von Bedeutung ist, mag dies vollständig begründet sein, für gewöhnliche Beleuchtungsmaschinen jedoch sollten folgende Gesichtspunkte erwogen werden:

Wie die Tafel I zeigt, genügt die gleiche Zahl *a w*, welche für 7400 Kraftlinien pro cm² in Gusseisen erforderlich ist, um 15000 d. h. rund zweimal mehr Kraftlinien im Stahlguss zu erzeugen; mit andern Worten: Zur Erreichung einer bestimmten Zahl Kraftlinien (Φ) muss bei Anordnung von Gusseisen den Magneten doppelter Querschnitt gegeben werden. Da nun Stahlguss ca. 50—60 Cts. per kg und Gusseisen bloss 25—30 Cts. kostet, so stellen sich die beiden hinsichtlich Preis ungefähr gleich; das geringere Gewicht des Stahlgusses würde sogar zu dessen Gunsten sprechen. Andererseits jedoch ist nicht jede Maschinenfabrik auch im Besitze einer Stahlgiesserei, dagegen dürfte es wenige Fabriken geben, welche nicht auch gleichzeitig eine Graugussgiesserei zur Verfügung haben. Die Lieferung wird dadurch, falls Stahlguss verwendet wird, bedeutend verzögert (Stahlguss verlangt mindestens 3—4 Wochen) und zu den blossen Gusskosten treten noch diejenigen für Transport und Retouchierarbeiten, welche bekanntlich nicht unerheblich sind. Zu bedenken ist auch, dass der Magnetkranz bei Stahlguss nicht wohl aus einem Stücke mit den Lagern gegossen werden kann. Wiegt man die Vor- und Nachteile gegeneinander ab, so wird man in den meisten Fällen zu dem Resultat gelangen, dass es bei grösseren Maschinen am empfehlenswertesten ist, den äusseren Kranz aus gewöhnlichem Gusseisen, die Polstücke, welche die Spulen tragen, dagegen aus Stahlguss mit runden Kernen und Polschuhen auszuführen, weil das Kupfergewicht dadurch bedeutend reduziert werden kann.

Diese Regel erleidet allerdings eine Beschränkung, wenn der Stahlguss weniger als 50 Cts. kostet. In einem solchen Falle wird also die Wahl zu Gunsten des Stahlgusses ausfallen.

2. Magnetspulen.

Der Wicklungsraum. Man achte darauf, den Wicklungsraum nicht zu knapp anzunehmen.

Mit Bezug auf die auf Seite 88 angegebenen Formeln ist der effektive Wicklungsraum durch das Produkt aus $s \times m$ bestimmt. Nun ist

$$s = \frac{(\mathfrak{J}\, m)\; m_1 \,.\, \mathfrak{L}}{E \,.\, 50}$$

und

$$m = \frac{(\mathfrak{J}\, m)}{\mathfrak{J}}.$$

Multiplizieren wir beide Gleichungen miteinander, so folgt mit Berücksichtigung des für die Isolation erforderlichen Raumes

(162) $$\text{Wicklungsraum } F = c \, . \, s \, . \, m = c \, . \, \frac{(\mathfrak{J}m)^2 \mathfrak{L}}{50\, w} \text{ in mm}^2.$$

w = Wattverlust pro Spule,
$(\mathfrak{J}m) = aw$ pro Spule,
$\mathfrak{L}$ = mittlere Windungslänge in m,
c = Koeffizient (siehe untenstehende Tabelle).

Es sind nun zwei Wicklungsarten zu unterscheiden.

Bei der ersten werden die Drähte direkt übereinander gewickelt, bei der zweiten Wicklungsart kommt je eine Windung der nachfolgenden Lage zwischen zwei Windungen der darunter befindlichen zu liegen (Fig. 252 *a* u. *b*). Da die letztere hauptsächlich für konische Wicklungen benutzt wird, wollen wir sie mit konische, die andere mit rechteckige Wicklung bezeichnen.

Der Koeffizient c nimmt mit dem Drahtdurchmesser ab und kann folgendermassen genommen werden:

Tabelle der Werte von c.

Drahtdurchmesser	$d =$	0,5	1	2	3	4	5 u. mehr
Rechteckige Wicklung	$c =$	5	2,9	2,15	1,86	1,68	1,57
Konische Wicklung	$c =$	3,75	2,2	1,6	1,4	1,26	1,18

Bedeutet m die totale Zahl Windungen pro Spule, m' die Anzahl Windungen der untersten Lage, so ist bei konischer Wicklung:

$$\text{Anzahl Lagen} = (m' + \tfrac{1}{2}) - \sqrt{(m' + \tfrac{1}{2})^2 - 2m}$$

Bei Verwendung von kreisrunden Eisenkernen statt viereckigen kann ca. 10—12 % an Kupfer gespart werden.

Wird der ursprünglich aus Gusseisen vorgesehene viereckige Eisenkern durch runde Stahlgusspole ersetzt, so reduziert sich dadurch das Kupfergewicht um 30—35 %.

Konstruktion der Spule. Das Gehäuse der Spule wird meistenteils aus gepresstem Karton, Isolit oder Asbest hergestellt (Weidmann in Rapperswyl, Gebr. Adt in Ensheim u. s. w.); Ebonit eignet sich hierfür nicht, weil es bei Erwärmung weich wird.

Bei vielen Maschinen trifft man auch Spulengehäuse aus Eisen oder Zinkblech, die mit Papier oder Tuch isoliert sind, wobei für die Endschilder Holz benutzt ist. Für konische Wicklung eignet sich sehr gut eine Spule aus Eisen- oder Zinkblech mit Papierisolation, wobei die Ränder ringsum aufgebörtelt werden, um der Wicklung einen Halt

zu gewähren. Zur Befestigung der fertigen Spulen auf dem Eisenkerne dienen Bolzen oder auch ganze Rahmen, letztere besonders, wenn die Spule nur aus Isolationsmaterial besteht. Bei Verwendung von eisernen Gehäusen kann die Befestigung auch dadurch geschehen, dass man das Blech mit angenieteten Lappen versieht, welche mit dem Kern verschraubt werden. Bei konischen Wicklungen müssen die äussersten Drähte einer Lage durch eingelegte Bänder gehalten werden.

Ableitungen. Es ist unter keinen Umständen zulässig, den Draht direkt nach den Klemmen zu führen, für die Ableitungen sind stets Kabel oder Kupferstreifen zu verwenden. Besonders die letzteren sind sehr bequem für die Verbindungen einzelner Spulen untereinander, indem man die beiden Kupferbänder mit einander verschraubt. Um zu verhüten, dass die Ableitung abgerissen werden kann, sollte man das Kupferband mit mehreren Windungen gleichzeitig verlöten (Fig. 252 *b*). Eine andere sehr gute Konstruktion besteht darin, die ganze letzte

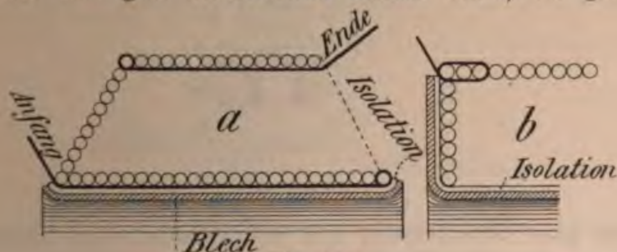


Fig. 252.

Lage über der isolierten Ableitung zu wickeln (Fig. 252 *a*). Als Isolationsmaterial können Miccastreifen dienen, welche sehr wenig auftragen, so dass man der Spule von aussen beinahe nichts ansieht.

Gebr. Adt in Ensheim und andere stellen Magnetspulen aus gepresstem Karton (Isolit) her, bei welchen der Drahtanfang in eine am Schild vorgesehene Nute verlegt wird.

Die richtige Herstellung der Ableitungen ist, so nebensächlich dieselben vielleicht erscheinen mögen, von entschiedener Bedeutung, weil durch eine unsaubere Ausführung das ganze Aussehen der Maschine gestört und der Eindruck einer oberflächlichen Arbeit hervorgerufen wird.

Ebenso wichtig ist auch die Ausführung der Spule überhaupt. Ganz besondere Aufmerksamkeit verdienen z. B. die Übergangsstellen von einer Lage in die nächstfolgende. So sorgfältig diese Arbeit ausgeführt wird, so entstehen an solchen Stellen stets Kreuzungen, welche das gute Aussehen etwas beeinträchtigen. Man sollte deshalb bei der Montage die Spulen derart einsetzen, dass diese Seite dem Auge mehr oder weniger entzogen wird.

Spulen aus dünnen Drähten haben ferner den Übelstand, dass

die letzte Lage gerne uneben wird. Dem kann dadurch vorgebeugt werden, dass man unter die letzte oder zweitletzte Lage rings um die Spule einen Karton von genügender Festigkeit legt, auf welchen die letzten Lagen gewickelt werden. Selbstverständlich ist dies nur bei rechteckiger Wicklung möglich.

Eine zweite, hauptsächlich in Amerika gebräuchliche Methode besteht darin, über die fertige Drahtwicklung eine Lage dicker Schnüre zu wickeln, welche den Eindruck einer Seriewicklung hervorruft und gleichzeitig dem Draht einen vorzüglichen Schutz gegen äussere Beschädigungen gewährt.

C. Klemmen und Kabelschuhe.

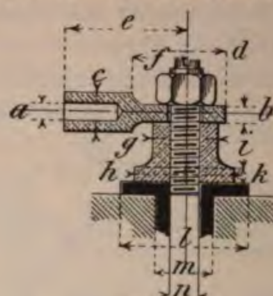


Fig. 253.

Tabelle über Dimensionen von Kabelschuhen und Klemmen.

Ampère	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m	n mm[1])	n engl. Zoll
5	2	2	6	15	22	11	13	19	9	3	25	12	6	1/4
10	3	2	7	15	24	12	13	19	9	3	25	12	6	1/4
15	4	3	8	15	26	13	13	19	9	3	25	12	6	1/4
25	5	3	10	19	30	14	16	24	10	4	32	15	8	5/16
35	6	4	11	19	34	15	16	24	10	4	32	15	8	5/16
50	7	5	13	19	38	16	16	24	10	4	32	15	8	5/16
70	8	5	14	24	42	18	20	30	15	5	40	18	10	3/8
100	10	6	16	24	45	20	20	30	15	5	40	18	10	3/8
150	12	7	17	30	50	20	25	36	17	6	48	21	12	1/2
220	14	8	20	30	55	24	25	36	17	6	48	21	12	1/2
300	17	9	26	38	65	28	32	48	20	7	60	26	16	5/8
400	20	10	30	38	70	30	32	48	20	7	60	26	16	5/8
550	25	12	37	45	80	32	40	60	22	8	75	31	20	3/4
750	30	15	45	55	95	40	50	75	26	10	90	37	25	1
1000	35	17	50	66	100	45	60	85	30	10	100	44	30	1 1/4

[1]) Gewindesystem der Société de l'Encouragement.

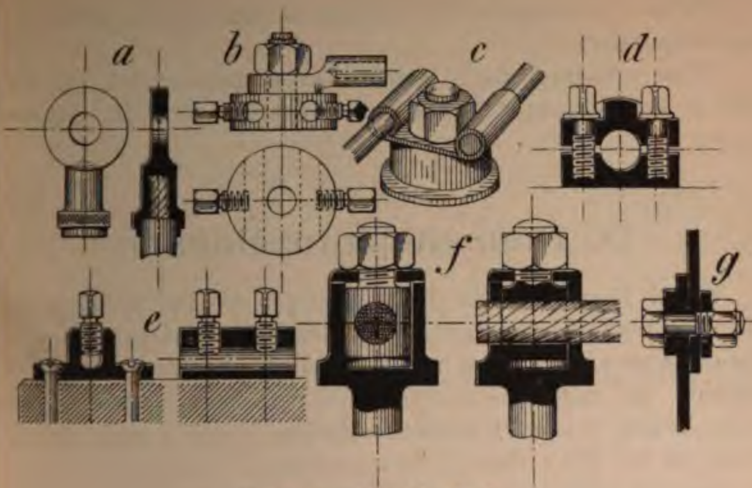


Fig. 254. Kabelschuhe.

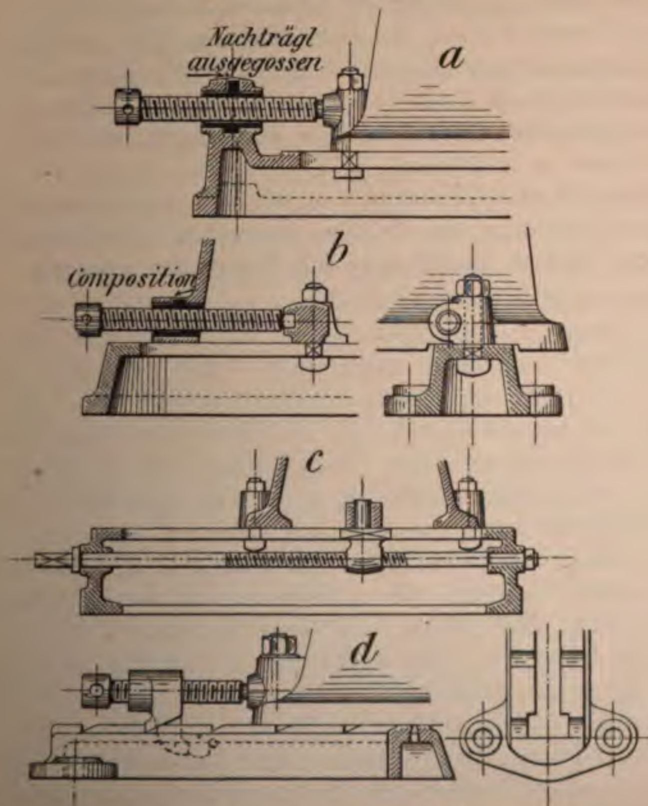


Fig. 255. Riemenspannvorrichtungen.

Weitere Kabelschuhe und Klemmen sind in den Figuren 254 *a—g* dargestellt.

Einen sehr sauberen Abschluss giebt hauptsächlich der Kabelschuh *a*, bei welchem die Isolation ein Stück weit in die Öse hineingelassen ist.

D. Riemenspannschienen.

Wo die Dynamos nicht direkt gekuppelt werden, sollten dieselben stets auf Spannschienen montiert werden. Die geringen Kosten derselben kommen, verglichen mit den bedeutenden Vorteilen, kaum in Betracht. Bei mittelgrossen Maschinen genügen in der Regel zwei Spannschienen, grössere Maschinen erfordern dagegen noch eine dritte Schiene in der Mitte ohne Spannvorrichtung.

Fig. 255 zeigt einige der üblichen Spannvorrichtungen, und zwar Fig. *b* eine ältere Anordnung der Dynamos J. Farcot, Fig. *d* Dynamo Brown, Boveri & Cie.; die Anordnung Fig. 255 *b* hat den Vorteil, dass die Spannschienen bedeutend verkürzt werden können, für grössere Maschinen ist jedoch die Anordnung *a* vorzuziehen, oder der Support mit der Spannschraube verschiebbar anzubringen, um die Länge der Spannschraube zu verkürzen.

Verwendet man Viereckgewinde, wie dies ja auch am meisten vorkommt, so kann man sich das Gewindschneiden in der Mutter ersparen, indem man einfach die Schraube mit Kompositon umgiesst.

[redacted]

IX. Beschreibung ausgeführter Maschinen.

Nachdem wir in dem vorigen Kapitel die verschiedenen Konstruktionselemente einzeln besprochen haben, mögen hier eine Anzahl Schnittzeichnungen kompletter Maschinen folgen.

Diese Sammlung hat einerseits den Zweck, dem Leser einen Überblick über die geeignete Kombination der verschiedenen Maschinenelemente zu geben und ihn gleichzeitig in die Kenntnis des Weltmarktes und dessen hauptsächlichste Erzeugnisse einzuführen.

Da nun allgemein das Studium der Maschinenzeichnung der angewandten Elektrizität vorausgehen muss, konnte um so eher von der Wiedergabe perspektivischer Ansichten Umgang genommen werden, und wurden solche nur da benutzt, wo sie zum Verständnis der Schnittzeichnungen dienlich sein konnten. Auch mag bemerkt werden, dass in dieser Sammlung prinzipiell nur mustergiltige Maschinen berücksichtigt wurden, ohne irgendwelche Rücksicht auf ihre Herkunft.

Maschinenfabrik Oerlikon. Fig. 256 *a* u. *b* zeigen zwei Schnitte einer zweipoligen Beleuchtungs-Dynamo der Maschinenfabrik Oerlikon, welche auch gleichzeitig als Repräsentantin einer grösseren Zahl von Maschinen betrachtet werden kann, deren charakteristische Eigenschaft in zwei magnetischen Stromkreisen mit direkt auf die Pole gesetzten Magnetspulen besteht. Als besondere Vorteile dieses Types sind zu nennen: Einfache und leichte Form und geringer freier Magnetismus (Streuung nach aussen hin), zwei Dinge, welche ihn hauptsächlich geeignet machen für kleine Motoren bis zu ca. 20 PS. In der That ist dies diejenige Maschinenform, welche vielleicht am häufigsten angetroffen wird. Die Armatur ist hier des besseren Aussehens wegen mit einer Tuchverkleidung versehen, welche durch zwei Bandagen am Kommutator und am Armaturumfang gehalten ist.

Bei Fig. 257*a* und *b*, einer mehr noch für Kraftübertragungen benützten älteren Maschine mit hoher Spannung der Maschinenfabrik Oerlikon, sind ebenfalls zwei magnetische Stromkreise vorhanden, jeder derselben hat indessen seine eigene Magnetspule. Bezüglich der Schmierung ist hinzuzufügen, dass bei sämtlichen neueren Maschinen die ursprüngliche Dochtschmierung den heutigen Anforderungen gemäss durch Ringschmierung ersetzt ist. Diese unter dem Namen „Manchesterdynamo" bekannte Form hat hauptsächlich vom ästhetischen Standpunkte aus ihr Bestechendes und wird trotz einiger ihr anhaftender Mängel, wie grösseres Gewicht, grössere magnetische Streuung, sehr viel gebaut. Würde es sich zwar darum handeln, eine Maschine mit minimalem Gewicht herzustellen, so liesse sich auch der Manchestertype zur Not vom gleichen Gewichte wie der erst angeführte konstruieren; mit Rücksicht auf ein dem Auge gefälliges Aussehen müssen jedoch der Form einige Konzessionen auf Rechnung des Gewichtes gemacht werden.

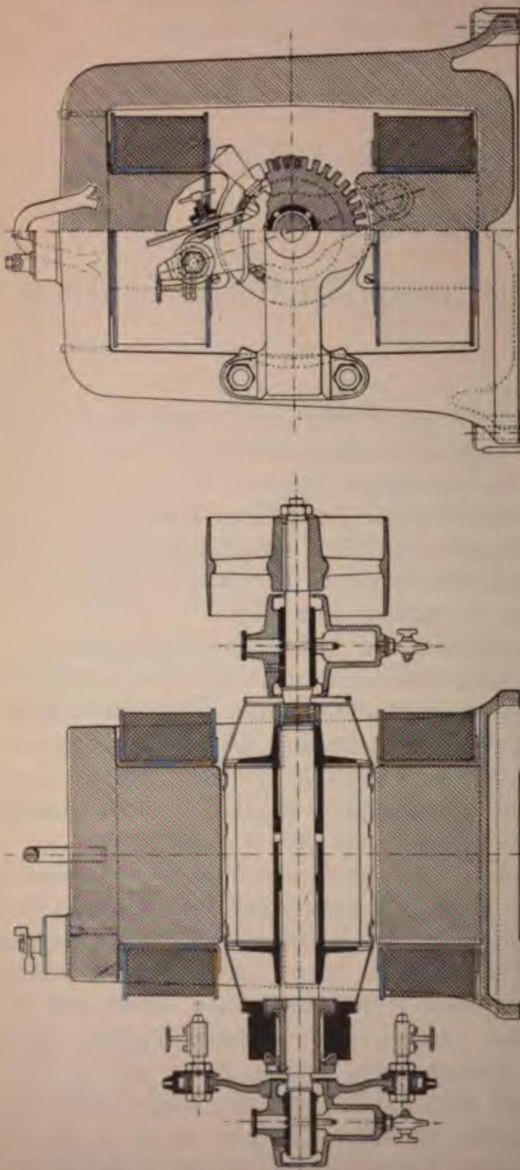


Fig. 256*a* und *b*. Maschinenfabrik Oerlikon: Zweipoliger Type.

Dieser Type ist hauptsächlich durch die Firma Brown, Boveri & Co. zu seiner ästhetisch vollendeten Ausbildung gelangt, wie die Photographie 258 zeigt. Die Detaills des Bürstenhalters und der

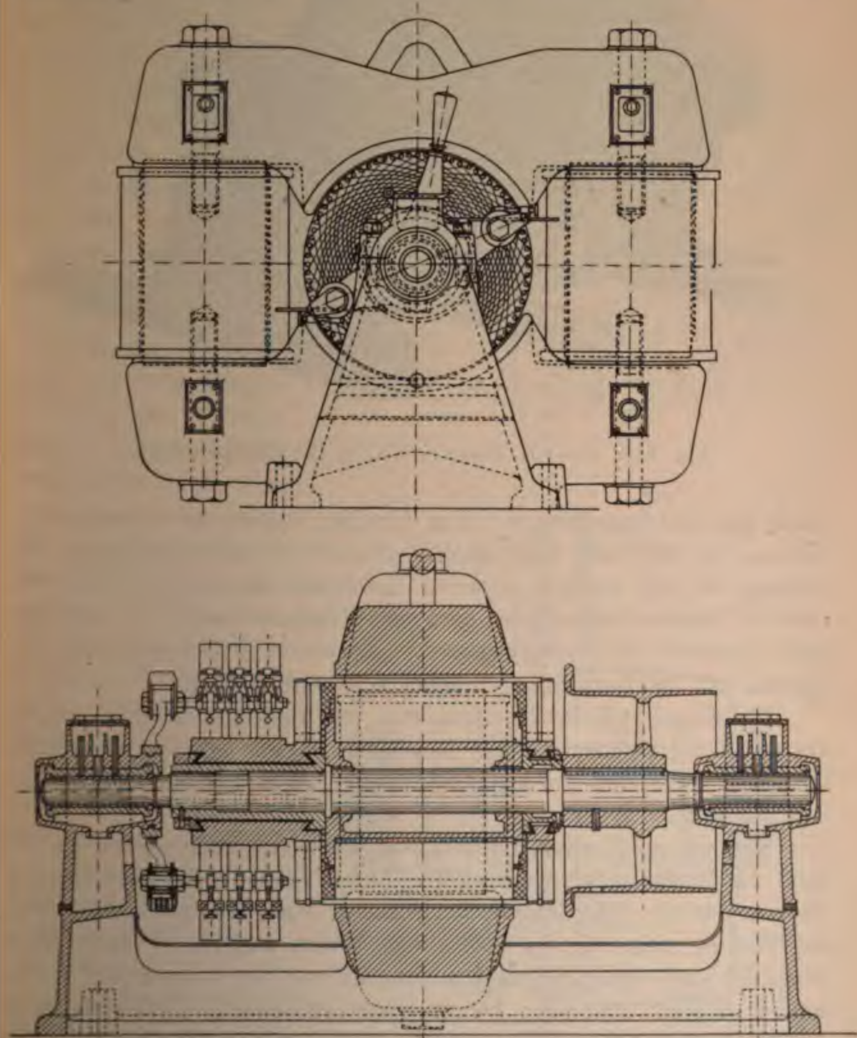


Fig. 257*a* und *b*. Maschinenfabrik Oerlikon: Älterer zweipoliger Type.

Riemenspannvorrichtung wurden anlässlich der Fig. 239, 241 u. 255*d* besprochen. Die Armatur ist als Ring ausgebildet.

Fig. 259*a* und *b* bezieht sich auf eine vierpolige Dynamo der Maschinenfabrik Oerlikon, deren Armatur im grösseren Massstabe



Fig. 258. Brown, Boveri & Cie. Zweipoliger Type.

durch Fig. 214 gegeben ist. Um dieselbe bequem herausnehmen zu können, ist die obere Magnethälfte abnehmbar, eine Anordnung, die übrigens bei den meisten grösseren Maschinen wiederkehrt. Die Pole und der äussere Magnetkranz sind aus Grauguss hergestellt und mit dem Lagerbock zusammengegossen. Besondere Polschuhe sind vermieden, um die Bearbeitung möglichst zu vereinfachen.

Die Maschinenfabrik Oerlikon war vielleicht die erste, welche mit der Konstruktion vertikaler Maschinen begann und hat sich durch ihre zahlreichen und grossartigen Anlagen dieser Art einen besondern Ruf geschaffen.

Die in Fig. 260 *a* und *b* abgebildete sechspolige Dynamo von 120 PS dient zur Erregung der Generatoren (Thury) für die Kraftübertragung Chèvres-Genève. Das Gewicht der Armatur wird, wie ersichtlich, durch die Turbine aufgenommen. Von den beiden Lagern ist das untere zweiteilig und von gleichem Durchmesser wie der Flansch der Welle, um die letztere nach oben herausnehmen zu können. Die Schmierung erfolgt separat von den auf einem Ständer montierten Tropfschmierbechern aus und zwar für das obere Lager direkt, für das untere durch die ausgebohrte Welle. Unter jedem Lager sind Fangschalen für das abtropfende Öl angebracht. Bei der Wicklung sind die bereits auf Seite 292 erwähnten Prinzipien verfolgt. Da der Kommutator besonderer Umstände halber auf der oberen Seite disponiert werden musste, so ist die Wicklung hier mit einer Tuchverkleidung versehen.

Maschinenfabrik Alioth & Co. Basel. Sämtliche Maschinen von Alioth und zwar von 2 *KW* an sind mehrpolig ausgeführt und zeichnen sich durch ihre wohlgefällige rundliche Form aus. Fig. 261 und 262*a* und *b* zeigen verschiedene Schnitte einer kleineren Maschine. Die Magnetpole sind aus Stahlguss hergestellt und mit dem gusseisernen äusseren Magnetkranz verschraubt.

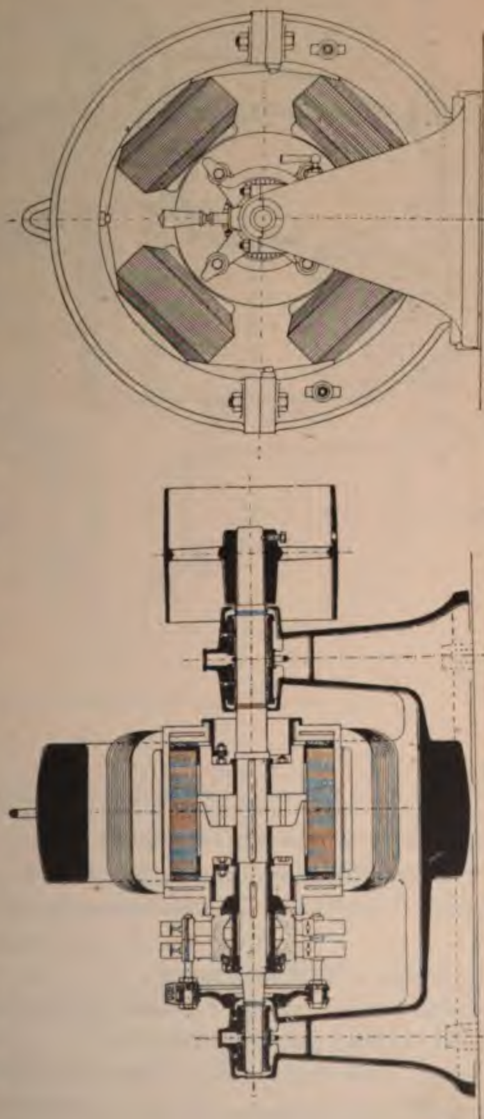


Fig. 259*a* und *b*. Maschinenfabrik Oerlikon: Vierpoliger Type.

Die Polschuhe besitzen die Eigentümlichkeit, dass die Kanten schief zu den Drähten stehen. Auf diese Weise wird die Bürstenverschiebung etwas reduziert, ohne notwendigerweise die Streuung zu vergrössern, wie dies eintritt, wenn man die Polspitzen näher zusammenrückt. Bemerkenswert ist auch die Armatur mit Ventilation und der mit Zahnkranz versehene Bürstenhalter Fig. 261, der zugleich als Verschalung dient. Bei dieser kleineren Maschine (15 *KW*) sind die Lager noch einteilig, die grösseren Modelle dagegen besitzen zweiteilige Lager und zweiteiligen Magnetkranz.

Eine ähnliche Konstruktion weist auch der zwölfpolige Tramwaygenerator für Basel (260 HP, 85 Touren) auf, Fig. 263*a* und *b*, der an der Schweiz. Landesausstellung in Genf figurierte.

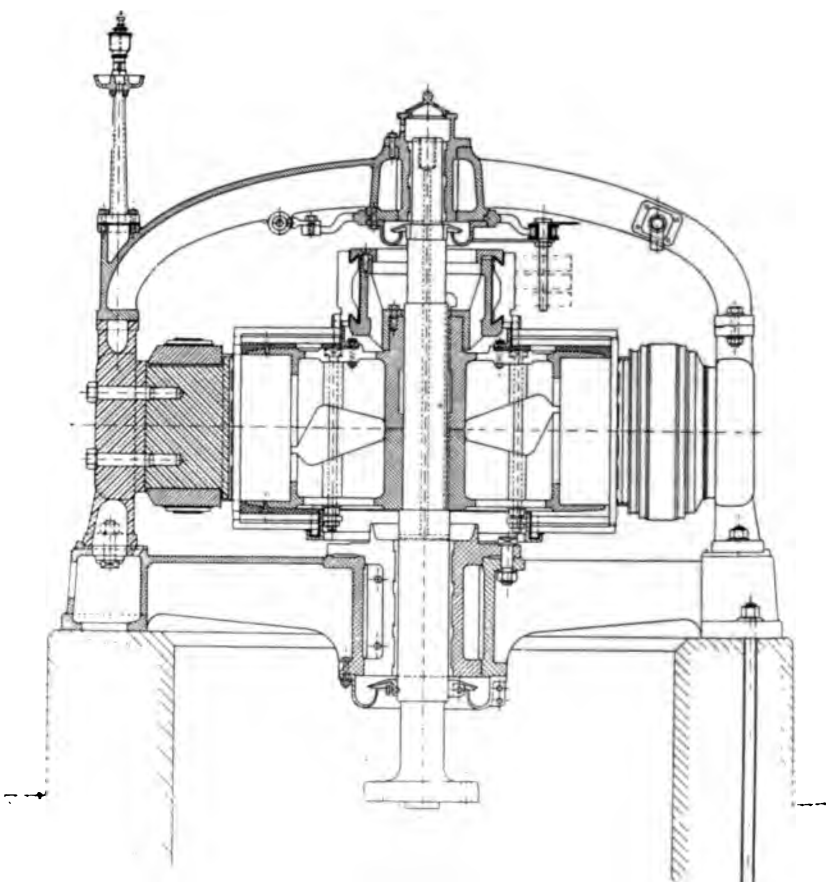


Fig. 260 *a*. **Maschinenfabrik Oerlikon.**

Die Daten desselben sind wie folgt:

Armaturdurchmesser $D = 200$ cm, Länge $l = 45$ cm
Anzahl Kommutatorsegmente $N_2 = 365$
Breite des Kommutators $l_2 = 13$ cm
Durchmesser „ „ $D_2 = 130$ cm
Zahl der Leiter $N = 730$
Querschnitt „ „ $s = 8 \times 4{,}5$ mm
Nutendimensionen $= 2{,}2 \times 0{,}85$ cm
Ausbohrung $= 201{,}6$ cm
Polbogen $b = 43$ cm.

Sehr originell ist die Armaturkonstruktion dieser Maschine, welche leider aus der Figur nicht gut ersichtlich ist: Der Eisenring besteht 18 Segmenten und zwar sind die Segmente jeder nächstfolgenden

[redacted]

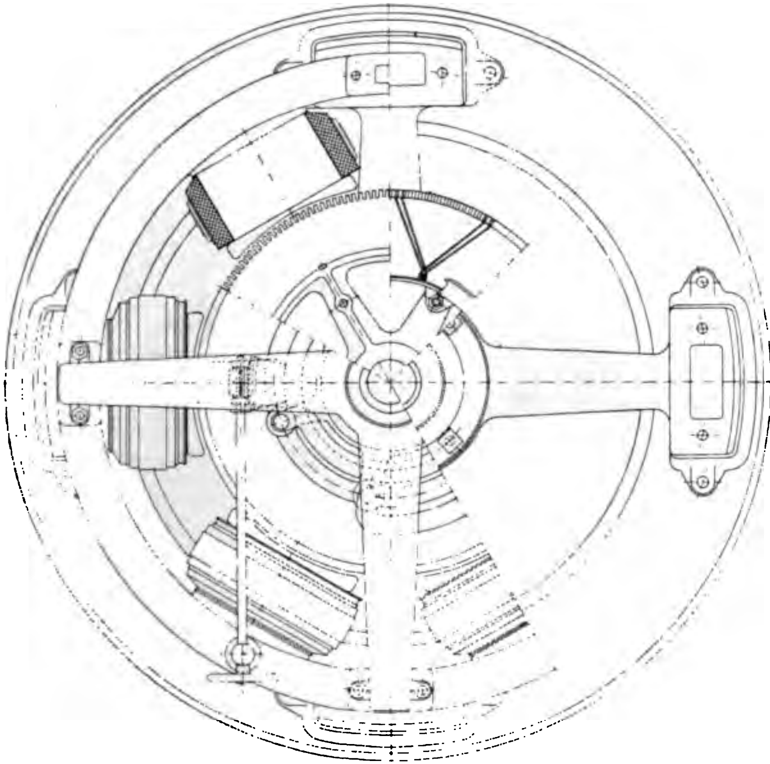


Fig. 260 *b*. Maschinenfabrik Oerlikon.

Lage gegenüber der vorhergehenden etwas verschoben. Zum Zusammenhalten der Bleche dienen einerseits durchgehende Armaturbolzen (zwei pro Segment), ferner sind zwischen den Rippen des Armatursternes schwalbenschwanzförmige Mitnehmer aus Bronze angeordnet, welche in die Eisenscheiben eingreifen und durch drei radiale Bolzen angezogen werden können.

Um die Wicklung gegen die Centrifugalkraft zu schützen, sind die Gabeln an der Abkröpfungsstelle mit einem runden Bolzen verlötet, welcher auf jeder Seite durch einen Fiberring gehalten ist. Diese Fiberringe sind in der Fig. 263 *a* noch leicht erkenntlich.

Statt der fliegenden Kabel, welche allgemein für den Bürstenhalter angewandt werden, wird der Strom hier durch spezielle Kontaktstücke abgenommen.

Die Cie. de l'Industrie Electrique (Société Thury) in Genf baut seit Jahren einen Maschinentype (Fig. 264 *a* und *b*), welcher sich

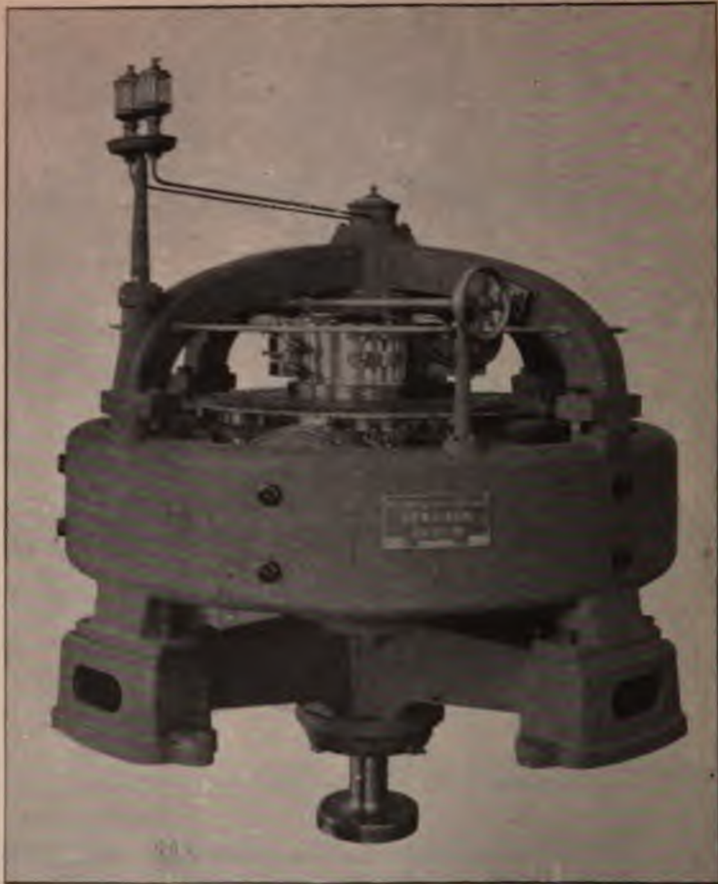


Fig. 260 c. Maschinenfabrik Oerlikon.

durch die Eigenart seiner Magnete auszeichnet. Die Spezialität dieser Gesellschaft bilden Gleichstromkraftübertragungen mit hoher Spannung. Aus der grossen Zahl ausgeführter Anlagen citieren wir nur einige wenige, welche durch die ungewöhnlich hohe Spannung auffallen. So z. B. läuft die Anlage in Biberist seit Jahren ununterbrochen mit 3500 Volt und wird nur alle Sonntage abgestellt. Zu bemerken ist noch, dass diese Maschinen selbst mit 5000 Volt probiert werden, eine Spannung, welche man in Europa wenig gewohnt ist, während sie in Amerika hier und da bei Bogenlichtmaschinen benutzt wird.

Im allgemeinen werden Kraftübertragungsmaschinen mit Seriewicklung ausgeführt, Thury hat indessen auch Nebenschlussmaschinen von 1600 (!) Volt gebaut (Kraftübertragung Stanserhorn).

Sehr interessant ist das von dieser Gesellschaft benutzte System ntereinander geschalteter Seriemotoren mit konstanter Stromärke, bei welcher die Konstanz der Tourenzahl durch mechanische eschwindigkeitsregulatoren, die mehr oder weniger Magnetwindungen nschalten, erreicht wird (siehe Photographie eines solchen Motors in g. 265). Bei der ersten und bekanntesten derartigen Kraftübertragung Genua sind drei Generatorstationen vorhanden; die Zahl der Motoren trägt 22 und die totale Spannung 8500 Volt. Noch höher ist die annung bei der Anlage La Chaux-de-Fonds und Locle (acht nheiten mit 14400 Volt zusammen).

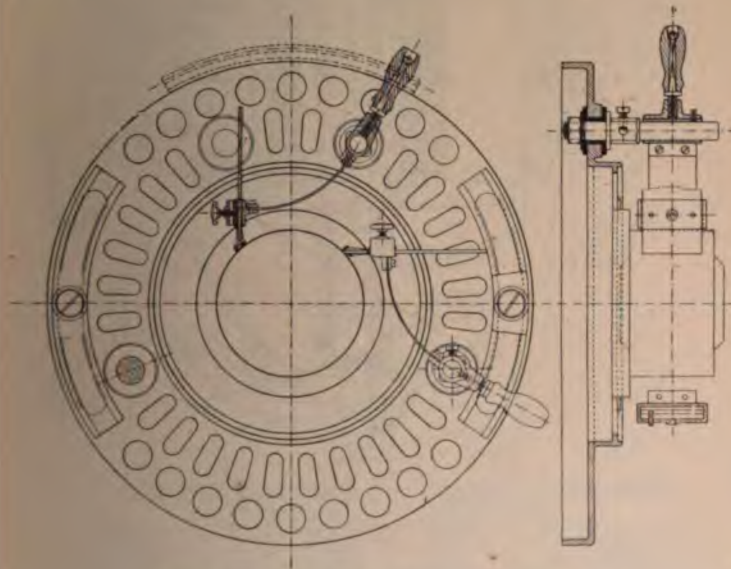


Fig. 261. Alioth & Cie.: Bürstenhalter.

Selbstverständlich müssen bei so hohen Spannungen nicht nur e Armatur, sondern auch die Magnete sorgfältig von dem Gestell liert werden. Eine weitere Sicherheitsmassregel besteht noch darin, ss diese Maschinen nicht auf Holz, sondern auf umgestülpte Porzellanlatoren montiert werden.

Für Spannungen bis zu 1800 Volt wendet Thury Trommeln, bei heren Spannungen Ringarmaturen an. Besonders charakteristisch d die Magnete aus gewalztem Eisen. Die Fabrikationsweise hat erbei zur Aufstellung einer begrenzten Zahl Profile verschiedener Durchesser geführt und es müssen folglich die intermediären Grössen durch tsprechende Verlängerung der Armatur erreicht werden.

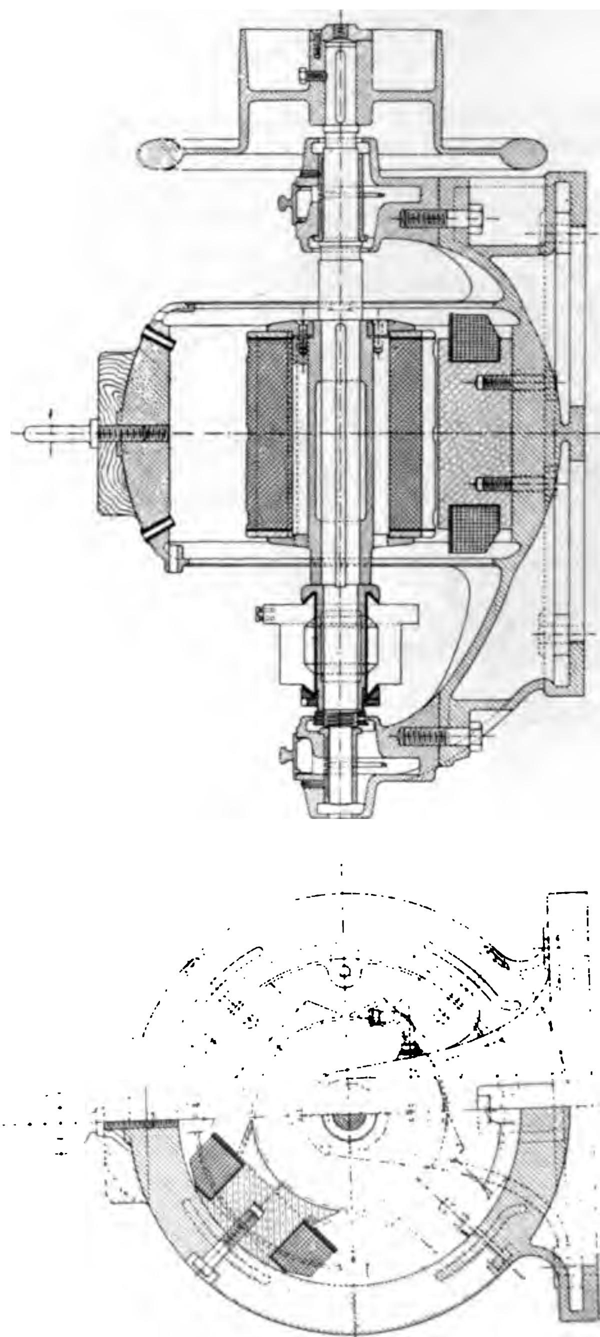


Fig. 262 *a* und *b*. Alioth & Cie.: Vierpoliger Type.

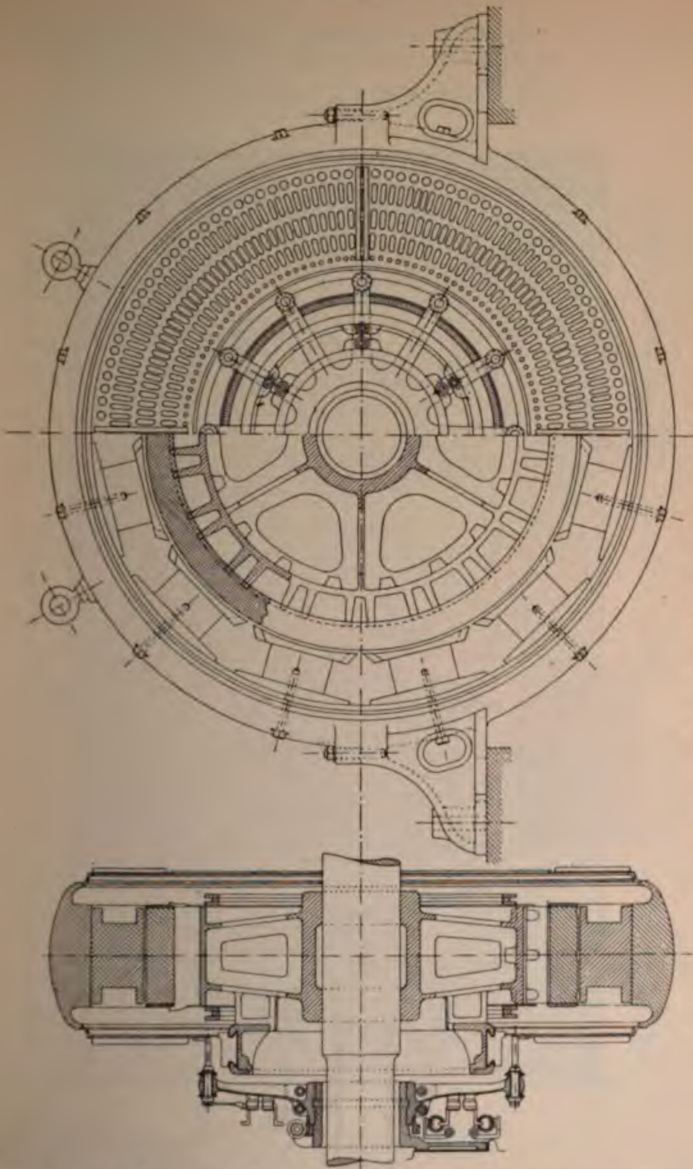


Fig. 263 *a* und *b*. Alioth & Cie.: Tramwaygenerator.

Die nachstehende Tabelle enthält einige Angaben über die verschiedenen Grössen der Maschinen Thury.

PS	25—30	50—100	100—200	300—400	500—600	800	1000	1500
Touren . . .	—	450	375	315	275	240	180	150
Pole	4	6	6	6	8	8	10	12
Ausbohrung cm	—	58	75	125	150	175	220	250

Anmerkung. Die vertikalen Generatoren der Mont Salève-Bahn sind z. B. vom zweit grössten Modelle. Die elektrischen Daten sind wie folgt:

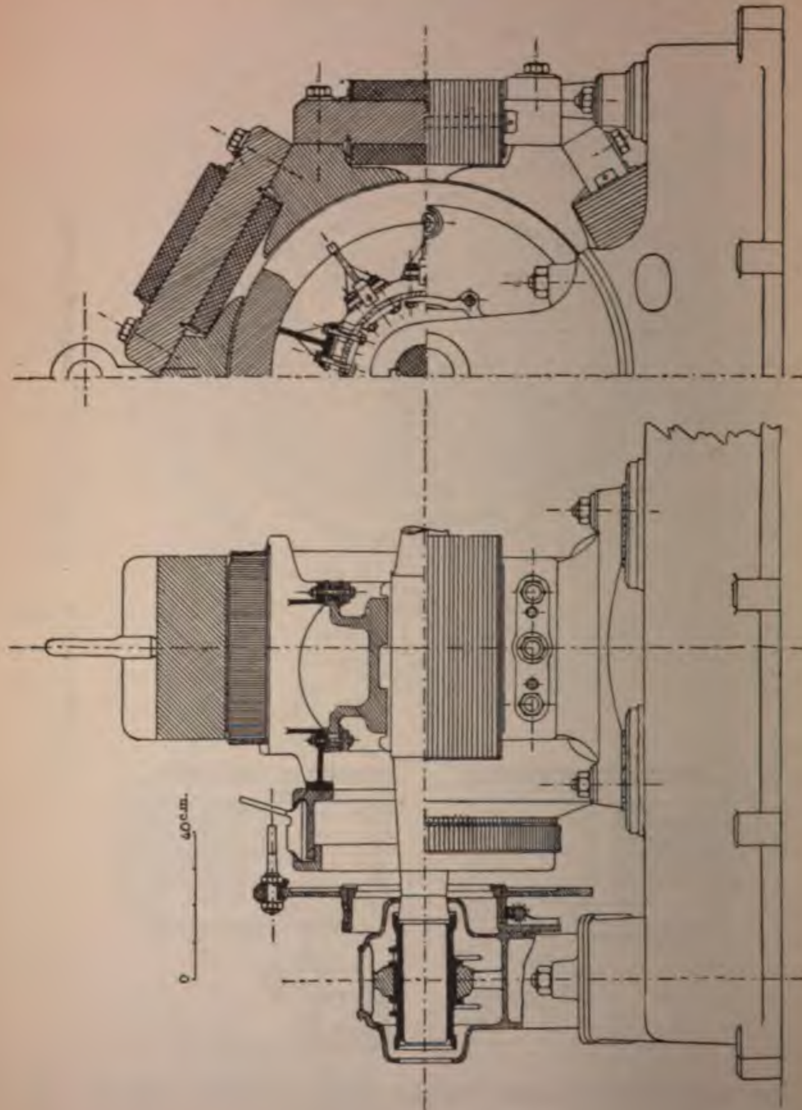


Fig. 264 *a* und *b*. Cie. de l'Industrie Electrique (Thury): Normaler Type.

Spannung = 600 Volt,
Strom = 275 Amp.,
Touren = 45,
Armatur = 451 Spulen à 4 Drähten parallel, Draht 3,3 mm nackt.

Kommutator: 1800 mm Durchmesser,
451 Lamellen,
12 Bürstenstifte à 3 Bürsten (Fig. 246),



Fig. 265. Cie. de l'Industrie Electrique (Thury): Kraftübertragungsmaschine.

Magnete: $\beta = 0,8$,
Drahtdurchmesser 7,5 mm,
Stromstärke 100 Amp. } separate Erregung.
Spannung 100 Volt }

Für sehr kleine Motoren wendet Thury neuerdings einen den Wechselstromgeneratoren nachgebildeten Type mit Kommutator an, dessen Konstruktion Fig. 266 *a* und *b* des engl. Pat. 29226 (19. Dezember 1896) erläutern.

Es muss hier bemerkt werden, dass der Verfasser unabhängig davon auf die gleiche Idee gekommen ist. Seine erste Zeichnung mit doppelter Armatur datiert vom Juni 1895. (Siehe auch Fig. 40, Taf. II, 3. Ausg. vom 3. Okt. 1896.) Dieser Type ergiebt sich ohne weiteres aus den gewöhnlichen Typen, indem wir alle positiven oder negativen Pole auslassen. Damit daher die Linien wieder nach dem Ausgangspunkte zurückkehren können ohne die Drähte zu schneiden, muss die Welle so verstärkt werden, dass sie alle Linien aufnehmen kann.

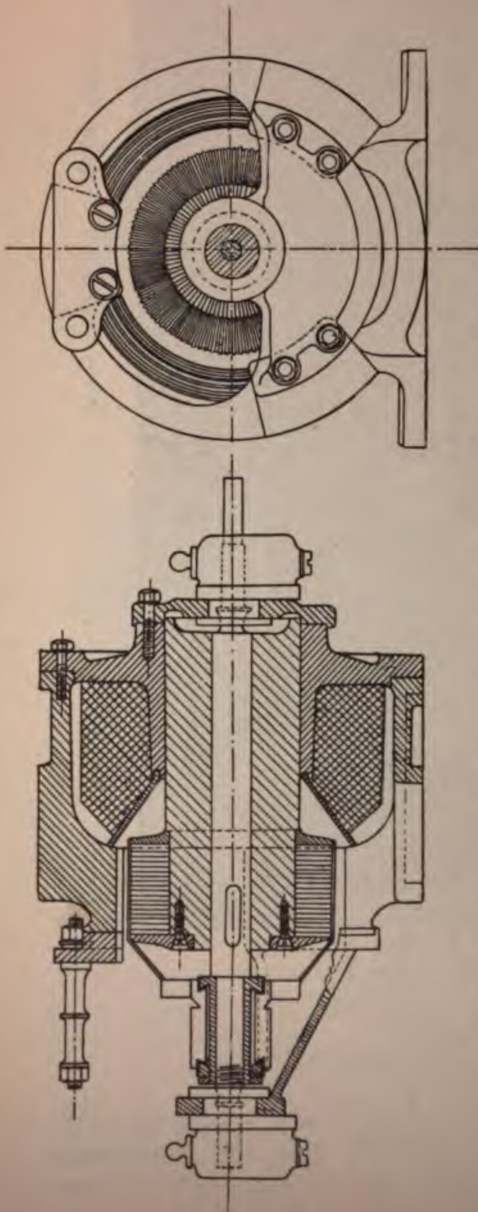


Fig. 266 *a* und *b*. Cie. de l'Industrie Electrique (Thury): Gleichpol-Motor.

Im übrigen ist die Armaturwicklung vollständig gleich wie bei den gewöhnlichen Maschinen. Wir sehen auch, dass die Spannung bei gleicher Linienzahl pro Pol nur halbsogross wie bei einer gewöhnlichen Maschine ist. Dieser bedeutende Nachteil wird jedoch durch etwas grössere Luftsättigung und breitere Pole ausgeglichen. Während nämlich bei einer gewöhnlichen Maschine der Polbogen ca. $\frac{D\pi}{3p}$ beträgt, darf er hier im Max. gleich $\frac{D\pi}{2p}$ angenommen werden, ohne dass dadurch die Streuung wesentlich vergrössert würde.

Von der Allmänna Svenska Elektriska Bolaget (Cie. Wenström), zur Zeit in Vesterås, rühren eine Menge bemerkenswerter Erfindungen auf elektrischem Gebiete her. Bekanntlich war Jonas Wenström einer der ersten Pioniere auf dem Gebiete der elektrischen Traktion und des Drehstromes; er hat auch die ersten vollständig in Eisen geschlossenen Dynamos und Locharmaturen gebaut und darf gleicherweise als Erfinder des einspuligen Magnetfeldes, Taf. II, Fig. 35—36, betrachtet werden, das bei den Wechselstrommaschinen eine so grosse Rolle spielt.[1])

Taf. II, Fig. 23, stellt einen ältern Type dieser Firma dar, der gegenwärtig aufgegeben ist. Fig. 267 und 269 zeigen zwei neuere Modelle. Die erste dieser Maschinen ist für 115 PS bei 435 Touren, die zweite für 320 PS bei 235 Touren bestimmt. Magnetkranz und Pole sind aus Stahlguss und bilden ein Stück, mit aufgeschraubten Polschuhen.

Das schon bei den Alioth'schen Maschinen beobachtete Bestreben, alle Bearbeitungsflächen so viel als möglich auf der Bohrbank herzustellen, tritt auch hier zu Tage. Grosse Sorgfalt weist die Konstruktion der Lager auf mit zwei Schmierringen und in der Mitte kugelförmigen Lagerschalen; desgleichen ist der Bürstenhalter der grösseren Maschinen sehr gediegen und solid ausgeführt. Der mit Löchern versehene Anker besitzt ausser den Hauptwicklungen noch eine Sayer'sche Kompensationswicklung (Fig. 268), womit bei normaler und selbst bedeutender Überbelastung ein absolut funkenloser Gang gesichert wird, ohne dass die Bürsten verschoben werden müssen. Leider wird dadurch die Zugänglichkeit der Wicklung bei allfälligen Reparaturen etwas erschwert.

Maschinenfabrik von Jos. Farcot, St. Ouen, Seine. Diese Maschinenfabrik baut seit 2 Jahren Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen nach den Angaben des Verfassers. Wir haben bereits einige Details dieser Maschinen beschrieben, so unter anderem den Kohlenbürstenhalter, welcher für sämtliche 2poligen Maschinen benutzt wird. Von den äusserst zahlreichen Typen, welche den mannigfaltigen Zwecken entsprechend ausgeführt wurden, sollen hier nur die hauptsächlichsten Platz finden.

Der zweipolige Type Fig. 270 *a* bis *d* wird für Leistungen von 2,5 bis 18 *KW* ausgeführt. Seine eigentümliche Form ist dadurch begründet,

---

[1]) Siehe „Några framsteg på starkströmstechnikens område under de senaste åren" von Ing. Rob. Dahlander, Teknisk Tidskrift, Stockholm 1896, ferner Lumière Electrique, 1886, Band 2, Seite 21.

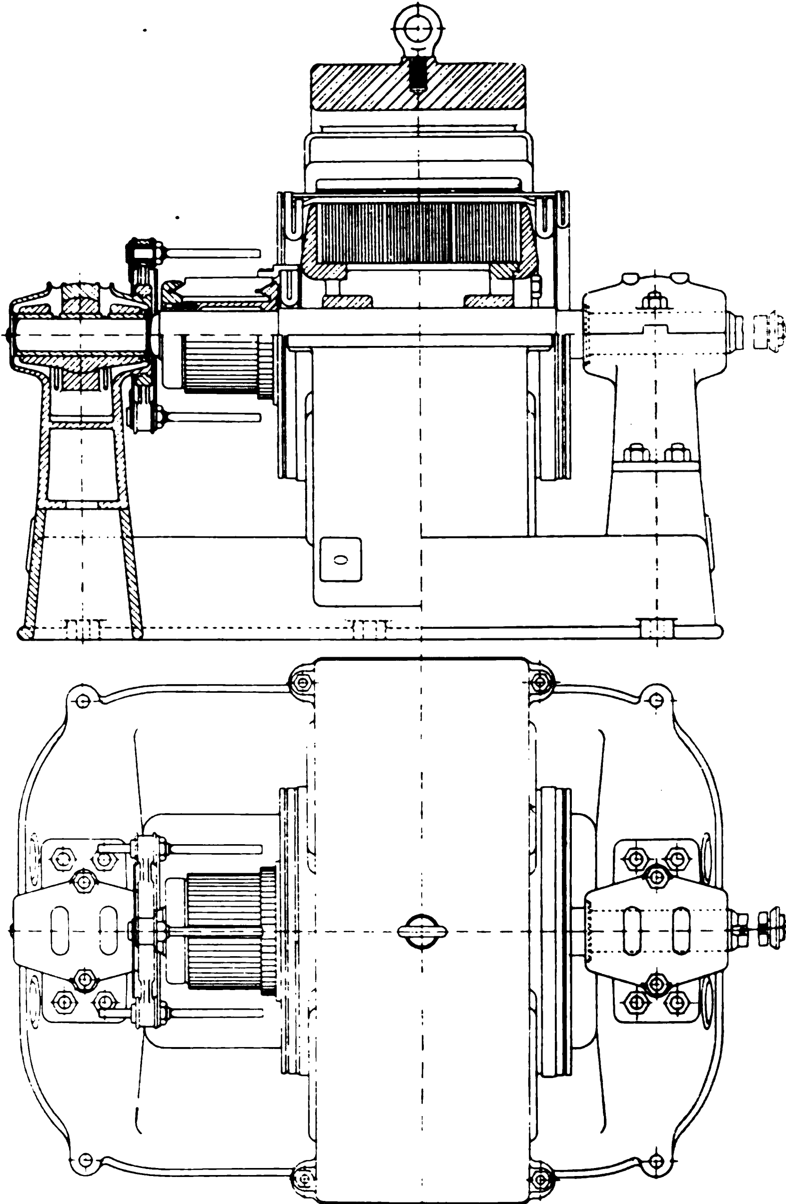


Fig. 267 *a* und *b*. Cie. Wenström: **Vierpoliger Type.**

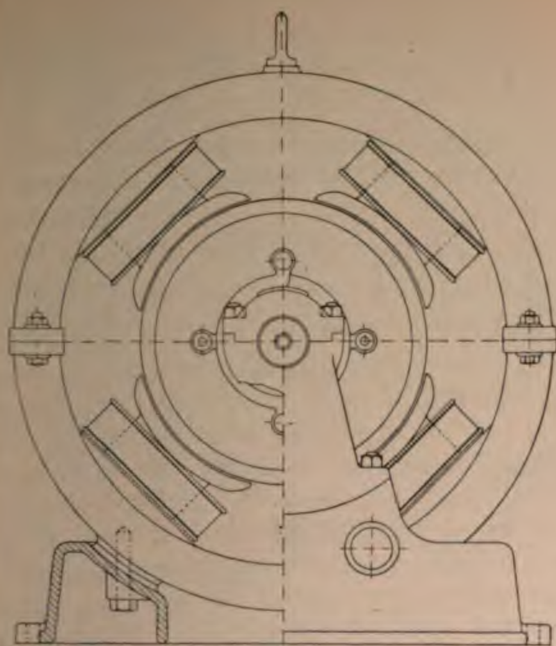
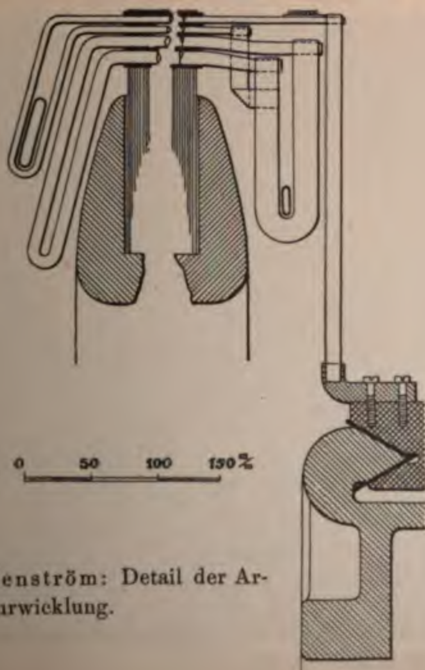


Fig. 267 c. Cie. Wenström: Vierpoliger Type.



Cie. Wenström: Detail der Armaturwicklung.

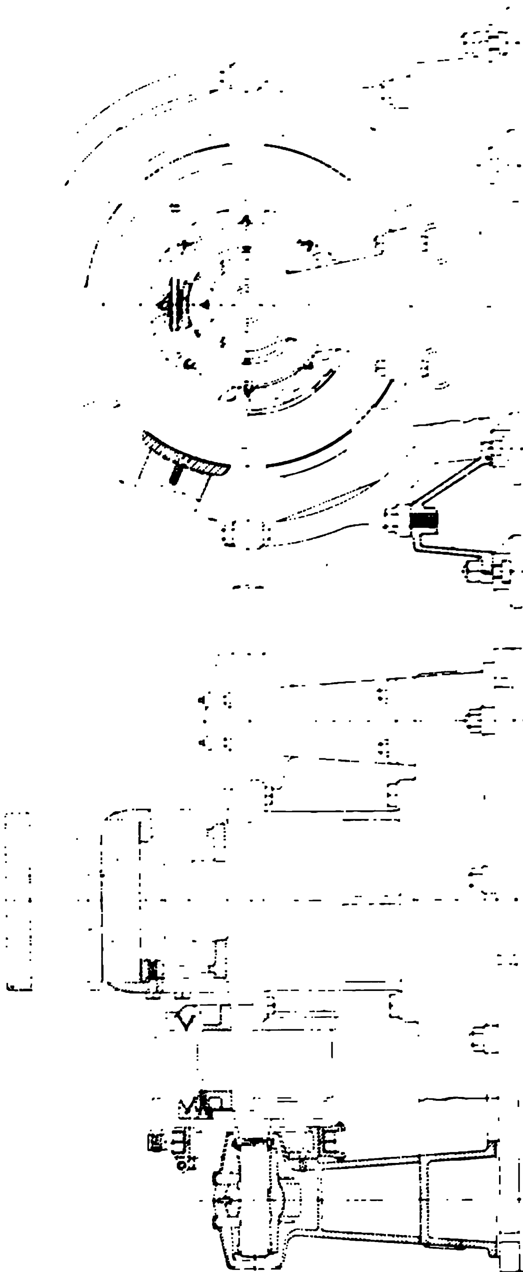


Fig. 269 *a* und *b*. Cie. Wenström: Achtpoliger Type.

dass die kleineren Maschinen sehr häufig auch als Motoren zum Antriebe von Werkzeugmaschinen, Krahnen und dergleichen benutzt werden. In diesem Falle ist es erwünscht, dass der Motor nach zwei Seiten hin möglichst wenig Platz beanspruche. Ferner muss darauf Bedacht genommen werden, die Wicklung gegen äussere Einflüsse zu schützen. Die Magnete besitzen nur eine einzige Spule, eine Disposition, welche der Verfasser schon seit acht Jahren mit Vorliebe benutzt. Die naturgemäss auftretende Dissymetrie in der Feldstärke wird durch eine in gleichem Masse stehende Verschiebung der Bürsten gegeneinander unwirksam gemacht. Durch sorgfältig berechnete Abmessungen und Bewicklung ist bei diesem Type erreicht, dass er ohne irgendwelche Bürstenverschiebung von Leerlauf bis auf 10 % Überbelastung beansprucht werden darf, ohne dass die geringste Funkenbildung konstatiert werden kann.

Diese Erscheinung mag auch teilweise dem Umstande zu verdanken sein, dass die Windungen einer Armaturspule auf mehrere Zacken verteilt sind (siehe Seite 235).

Die seitlichen Verbindungen zwischen den induzierten Drähten sind ringsherum von der Luft bestrichen und bei allfälligen Reparaturen sehr leicht zugänglich.

Sämtliche Wicklungen werden auf Schablonen hergestellt.

Die grösseren Typen von 25—89 *KW* sind vierpolig ausgeführt. Fig. 271 *a* bis *d* geben hiervon verschiedene Schnitte und Ansichten.

Es sei hier besonders auf die Wicklung, Brevet S.G.D.G. (Juli 1897) aufmerksam gemacht. Die letztere besteht aus Kupferbarren, welche auf der Seite der Riemenscheibe abgekröpft sind und zwar wird hier der Wicklungsschritt nur mit einer Gabel ausgeführt, während der andere Teil radiale Richtung hat. Gegen den Kommutator hin ist jeder Stab mit einer Lötstelle versehen. Auf diese Weise ist es möglich, jeden Armaturdraht separat auszuwechseln, ohne den übrigen Teil der Wicklung zu berühren, ein Vorteil, welcher bisher nur den Ringwicklungen eigen war. Die gusseisernen Arme des Armatursternes greifen in die Blechscheiben ein und dienen somit als Mitnehmer.



Fig. 270 a. Usine Jos. Farcot: Zweipoliger Type des Verfassers.

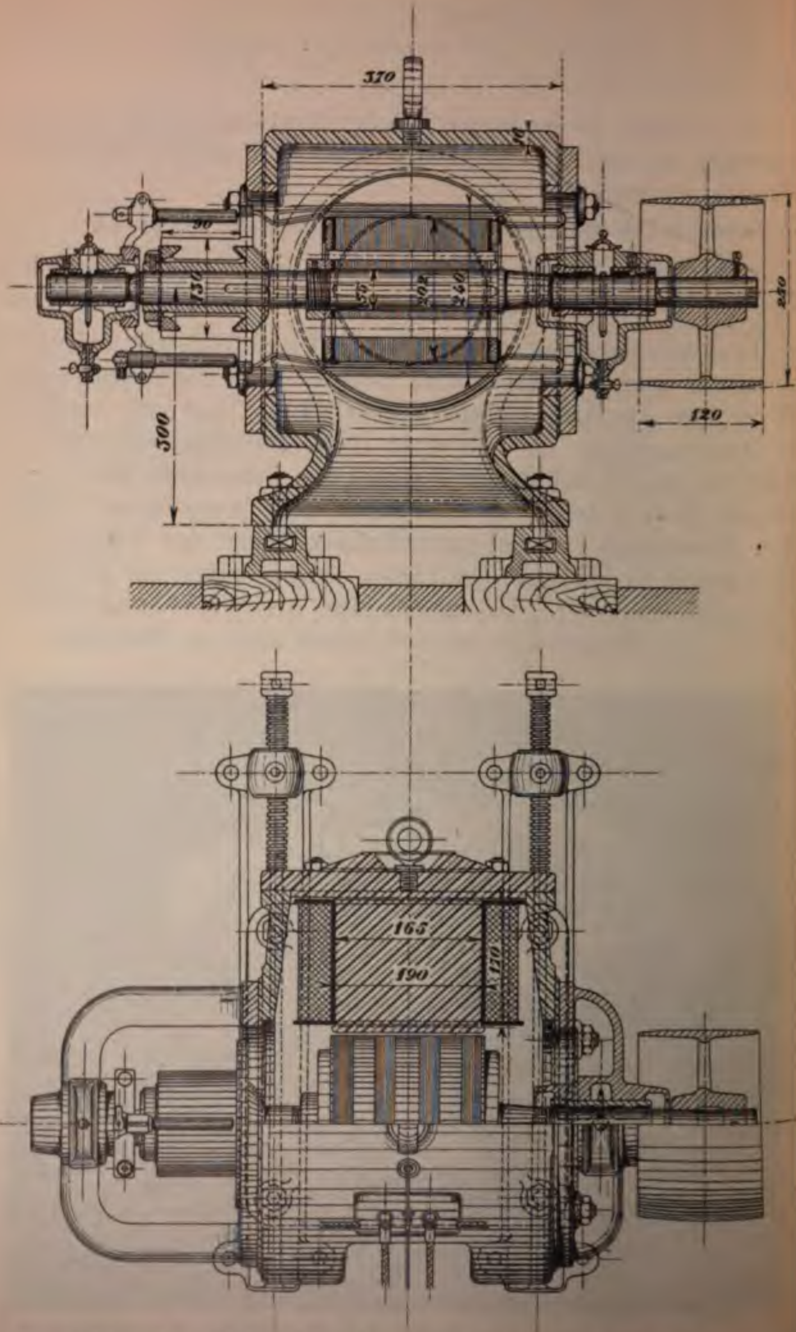


Fig. 270 *b* und *c*. Usine Jos. Farcot: Zweipoliger Type des V

[redacted]

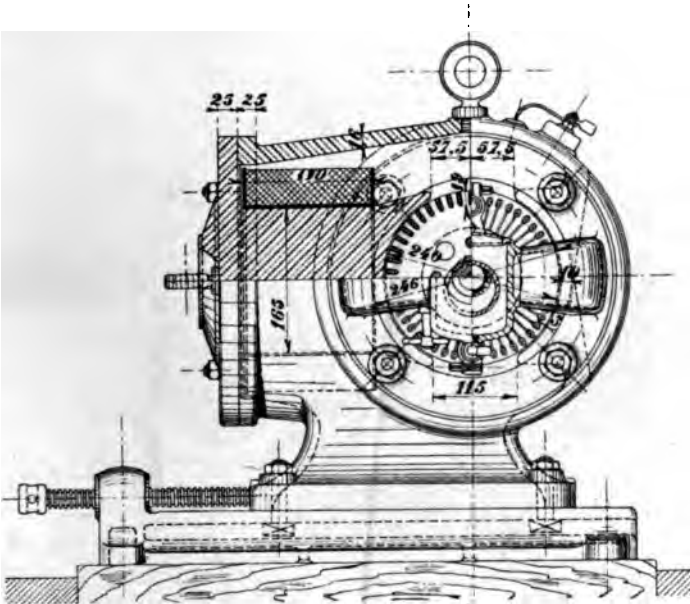


Fig. 270 *d*. Usine Jos. Farcot: Zweipoliger Type des Verfassers.

Um eine grössere Abkühlungsfläche zu erhalten, sind die Pole t tiefen Einschnitten von 2—3,5 cm Breite versehen (siehe S. 231).

Die Konstruktion der Lager, Spannschienen und Bürsten wurde ıon früher besprochen.

Von 100 *KW* an werden die Dynamos der Maschinenfabrik Farcot ;hs- und achtpolig ausgeführt mit gusseisernem äusserem Magnetkranz d runden Stahlgusspolen, eine Konstruktion, deren Vorteilen wir im ıp. VII Erwähnung gethan haben.

Fig. 272 veranschaulicht die Form einer 170 *KW* Maschine bei 0 Touren, wie dieselbe unter anderen für die Bicyclettefabrik adiator in Suresnes geliefert wurde.

Fig. 272 *d* zeigt eine photographische Ansicht dieser Maschine.

Die Daten der Dynamomaschine sind folgende:

$J = 1360$ Amp.,
$E = 125$ Volt.
$D = 116$ cm,
$l = 40$ „
$N = 216$,

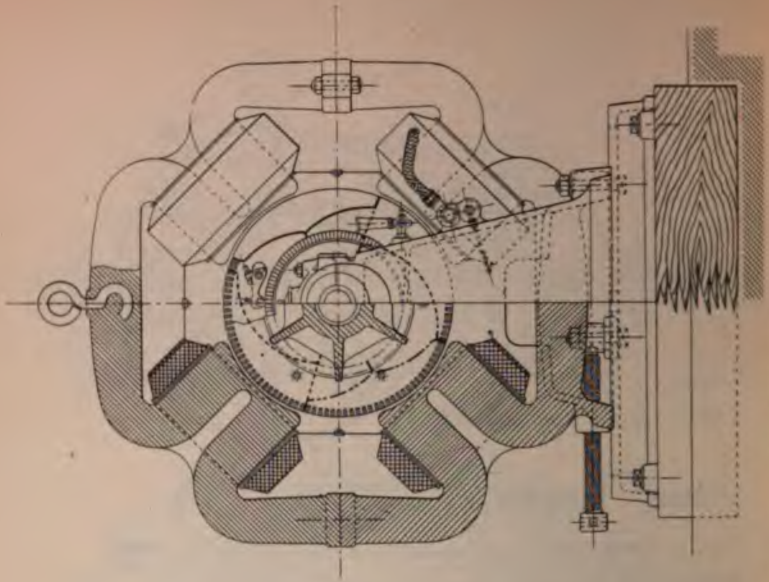




Fig. 271 a und b. Usine Jos. Farcot: Vierpoliger Type des Verfassers.

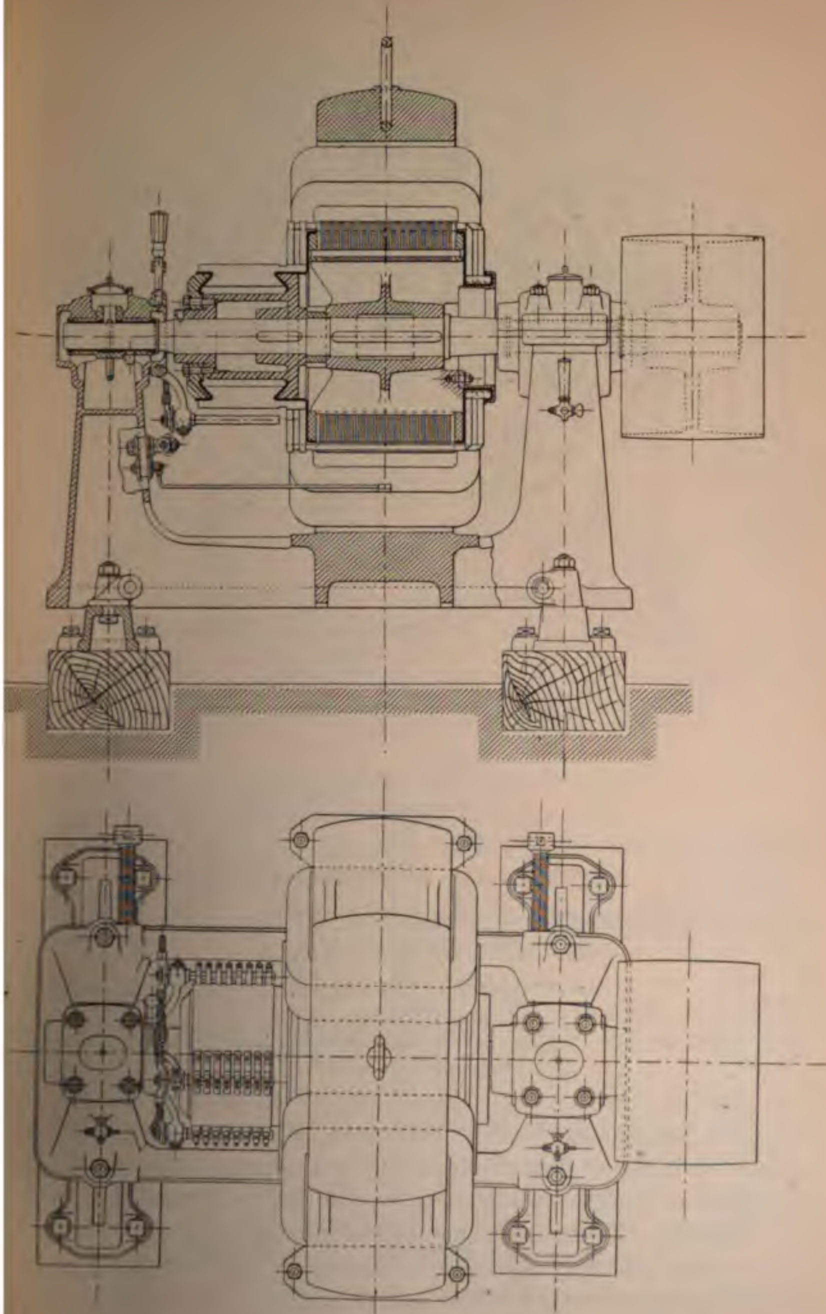


Fig. 271 *c* und *d*. Usine Jos. Farcot: Vierpoliger Type des Verfassers.

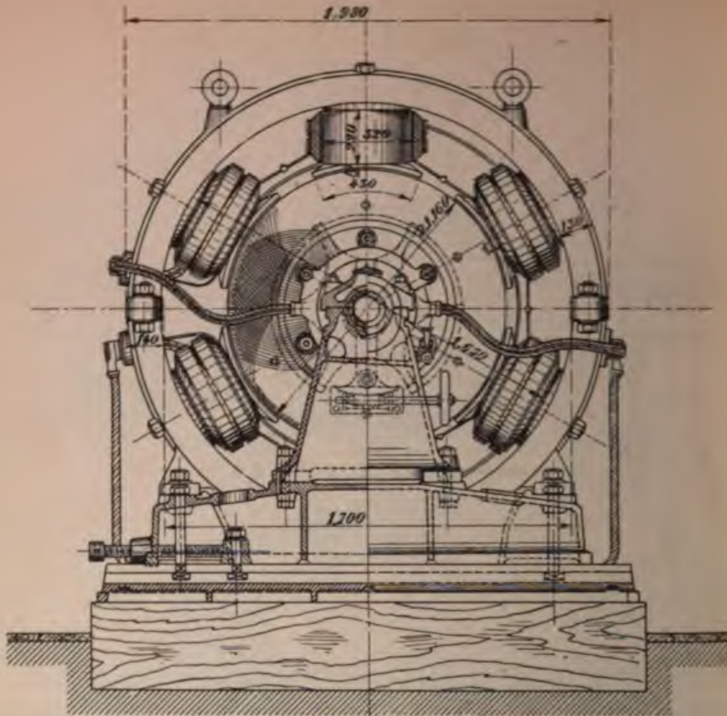


Fig. 272 *a*. Usine Jos. Farcot: 170 *KW* Dynamo des Verfassers.

Die Dynamo wird durch eine ein cylindrige Corlissmaschine, System Farcot, angetrieben von nachstehenden Dimensionen:

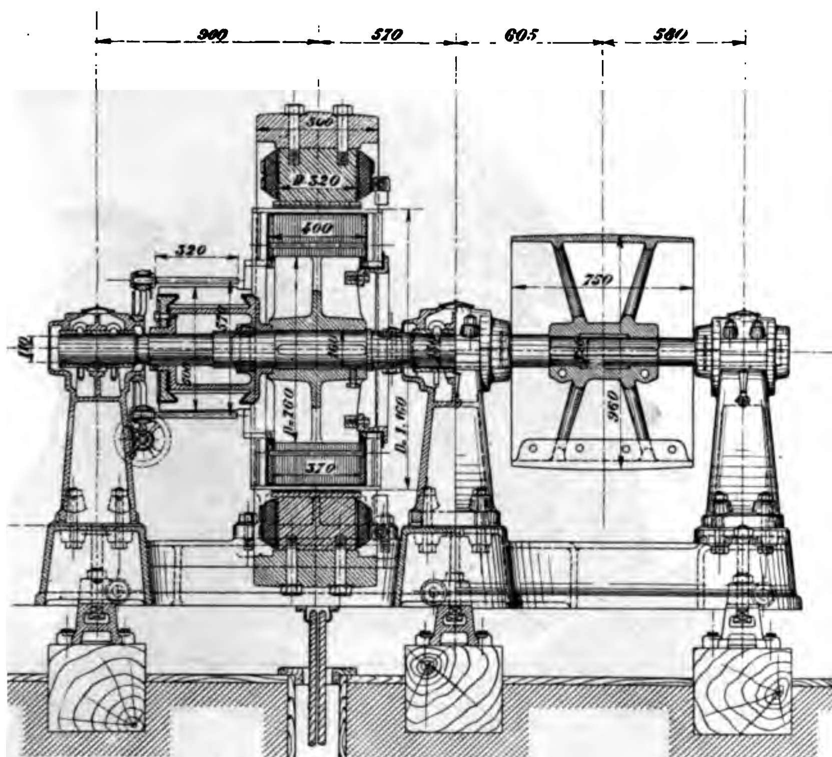
Cylinderdurchmesser	= 51,5 cm,
Hub	= 115 „
Tourenzahl . . .	= 72.

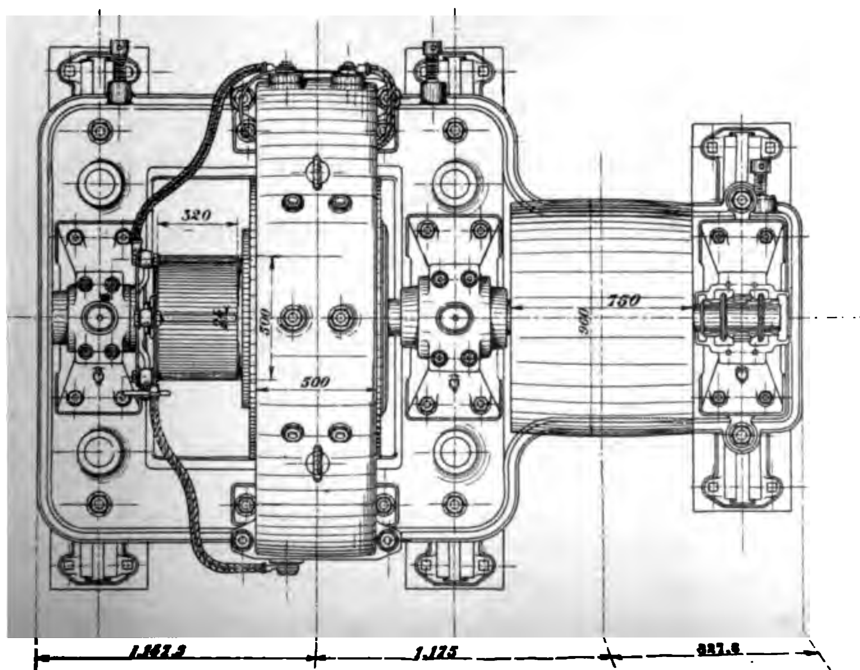
Noch mögen einige Spezialmaschinen dieser Fabrik angeführt werden.

Fig. 273 *a* und *b* stellt eine 600 *PS* Gleichstrommaschine mit fliegender Armatur für direkte Kuppelung bei 60 Touren dar. Da besondere Verhältnisse das Anbringen eines Lagers auf der Kommutatorseite verunmöglichten, wurde die Armatur fliegend vorgesehen.

Besondere Rücksichtsnahme erheischte die elastische Fundation, wodurch der Luftraum bei jedem Kolbenstosse verändert wird, und bedeutende magnetische Zugkräfte auftreten. Diese Schwierigkeit ist bei dem in Frage stehenden Type umgangen, indem die magnetische Anzugskraft für eine beliebige Lage der Armatur konstant ist.

[redacted]





nd c. Usine Jos. Farcot: 170 KW Dynamo des Verfassers.

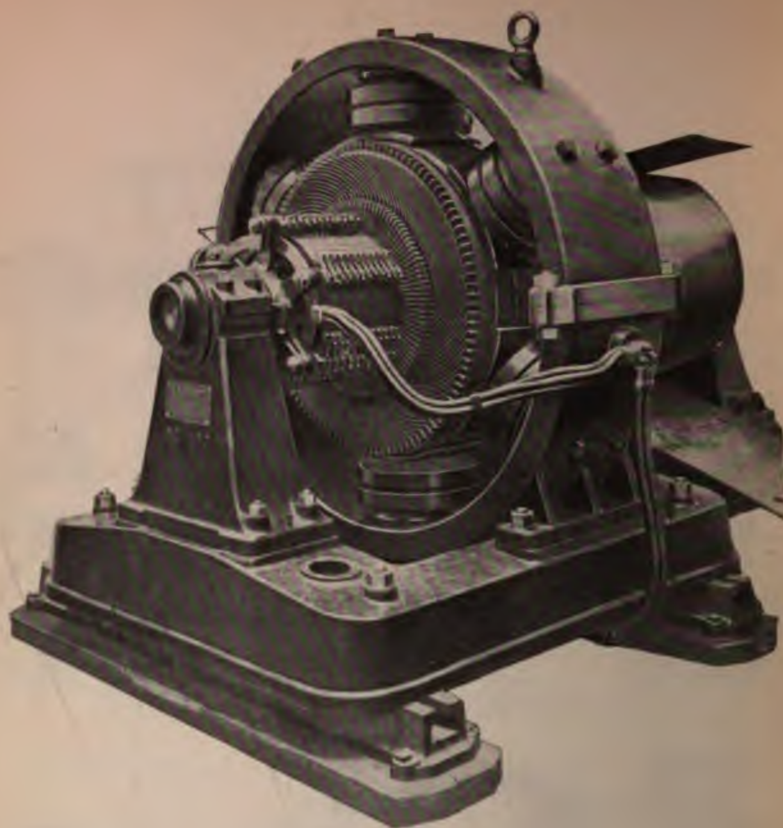


Fig. 272 *d*.

Die Armaturwicklung ist nach dem Serie-Parallelsysteme (Fig. 30) entworfen und die Magnete besitzen eine einzige Spule.

Bei dem vertikalen Motor, Fig. 274 *a* bis *c*, welcher zum Antriebe einer Pumpe dient, wird das Gewicht der Pumpe und der Welle durch einen Ringzapfen in Verbindung mit einem magnetischen Entlastungsapparat aufgenommen.

Bei den verschiedenartigen Ausführungen dieser Art hat es sich manchmal als notwendig erwiesen, die Tourenzahl dieser Motoren innerhalb sehr weiten Grenzen zu variieren. In solchen Fällen werden öfters Motoren mit 2 Armaturwicklungen benutzt, welche je nach Bedürfnis hintereinander oder parallel geschaltet werden.

Zum Schlusse führen wir noch eine kleinere Maschine für elektr*lytische* Zwecke an, welche die bereits auf Seite 48 behandelte

pensationswicklung des Verfassers besitzt. Die Daten dieser Maschine sind wie folgt:

Klemmenspannung	$E_1 = 5$ Volt,
Stromstärke	$J = 400$ Amp.,
Tourenzahl	$n = 800$,
Armaturdurchmesser	$D = 22$ cm,
Armaturlänge	$l = 14{,}4$ „
Kommutatordurchmesser	$D_2 = 12$ „
Kommutatorlänge	$l_1 = 15$ „
Anzahl Drähte	$N = 46$,
Anzahl paralleler Stromkreise	$p_1 = 2$.

Die Zahl der Bürsten pro Stift beträgt 8 mit einer Kontaktfläche von je 1,2 × 1,4 cm. Hiervon sind je 4 Bürsten um ca. 1,6 cm gegenüber den andern nach vorwärts verschoben, um zu verhüten, dass eine Wicklung für gewisse Bürstenstellungen ausgeschaltet wird.

Diese Maschine hat ein ganz ausgezeichnetes Resultat gegeben, indem selbst bei dreifachem normalem Strome ohne irgend welche Bürstenverschiebung auch nicht die geringste Spur von Funkenbildung wahrzunehmen war. Ferner geht aus der nachstehenden Versuchstabelle hervor, dass der Spannungsabfall durch Armaturreaktion gleich Null betrachtet werden kann, dagegen zeigt sich hier deutlich wieder, dass der Voltverlust an den Bürsten bei hohen Stromstärken unter Umständen ganz aussergewöhnlich gross werden kann.

Die Maschine wurde bei konstanter Klemmenspannung von 4 Volt und konstanter Erregung untersucht.

Stromstärke	300	400	500	700	900	Ampère
Klemmenspannung bei Leerlauf	4,75	5	5,15	5,65	6	Volt
Voltverlust in der Armatur	0,13	0,18	0,22	0,31	0,4	„
Übriger Spannungsabfall .	**0,62**	**0,82**	**0,93**	**1,34**	**1,6**	„

Nehmen wir den spezifischen Widerstand der Bürsten sehr niedrig und zwar 0,013 an, also kleiner als der von Dettmar ermittelte Wert, so ergeben sich hierfür bei den verschiedenen Belastungen folgende Verluste:

Stromstärke:	300	400	500	700	900	Amp.
Verlust:	**0,58**	**0,78**	**0,98**	**1,36**	**1,74**	Volt.

d. h. wir erhalten fast genau die in der obigen Tabelle angegebenen Zahlen.

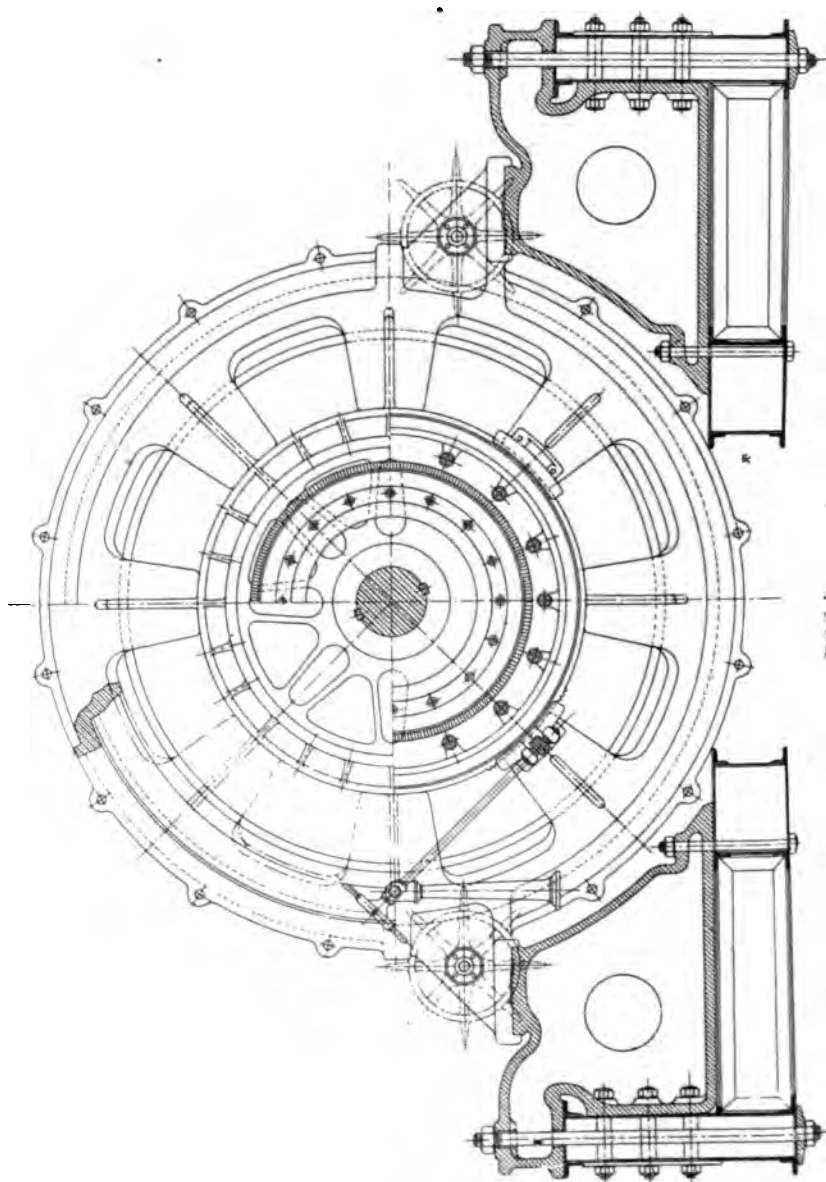


Fig. 273 *a*. Usine Jos. Farcot: 600 *PS* Schwungradmaschine, entworfen vom Verfasser.

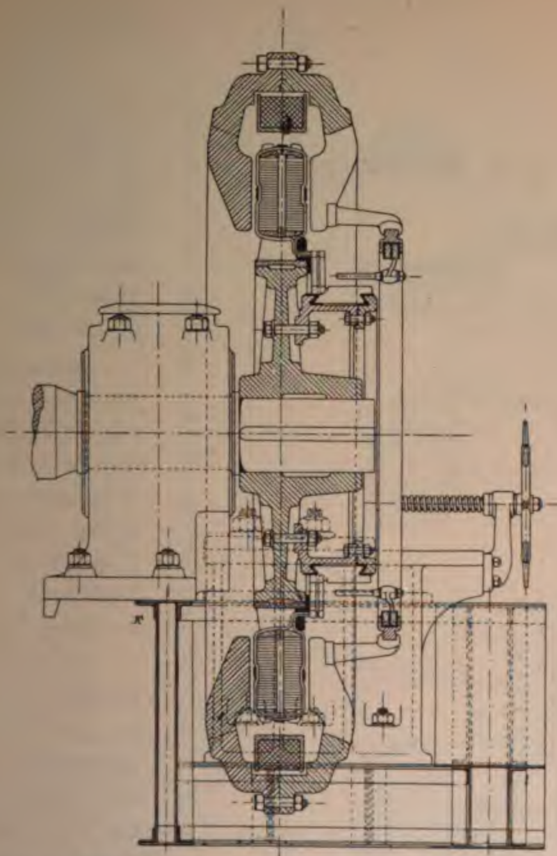


Fig. 273 *b*. Usine Jos. Farcot: 600 *PS* Schwungradmaschine.

Das Etablissement Breguet in Paris ist eine der ältesten elektrischen Maschinenfabriken Frankreichs und zählt mit der Maschinenfabrik Jos. Farcot zu den wenigen französischen Etablissements, welche ausschliesslich ihre eigenen Maschinen bauen. Von den Erzeugnissen desselben haben wir bereits die Gleichstrommaschinen, System Desrozier, mit Scheibenarmatur erwähnt.

Dieser Type wird hauptsächlich für direkte Kupplung mit der Dampfmaschine benutzt und hat sich bei Verwendung von soliden Fundationen ziemlich gut bewährt. Auffallend erscheint das sehr geringe Gewicht dieser Maschinen, wobei allerdings nicht vergessen werden darf, dass das Kupfergewicht infolge des grossen notwendigen Luftabstandes höher als bei anderen Maschinen ausfällt. Berechnet man das Totalgewicht der Maschinen nach der Formel

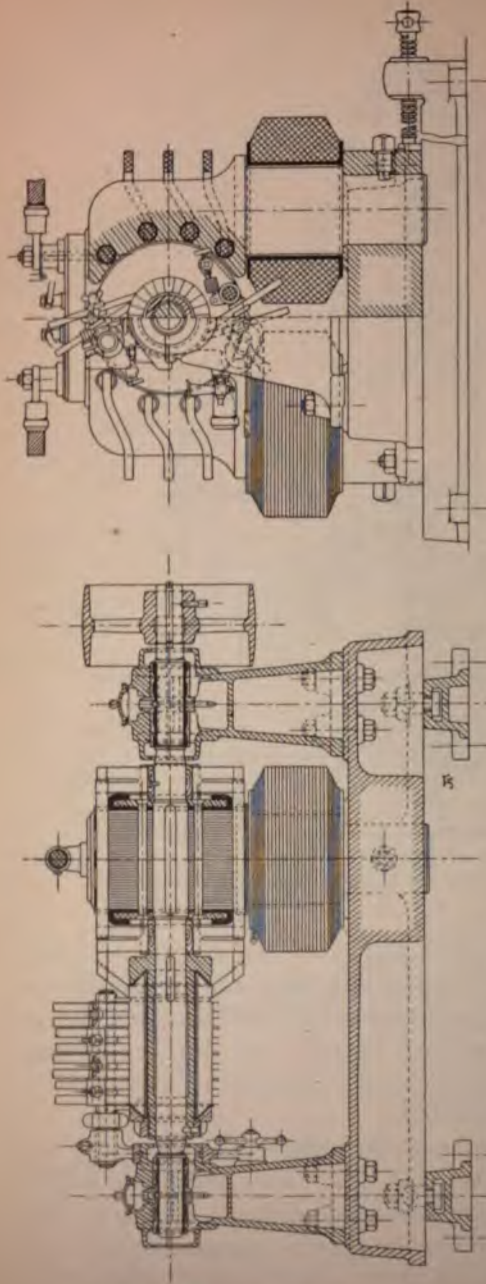


Fig. 275 *a* und *b*. Usine Jos. Farcot: Dynamo für metallurgische Zwecke, entworfen vom Verfasser.

Gewicht =

$c\left(\frac{\text{Wattl}}{\text{To}}\right.$

so kann der I
für Desrozi
nen = 120—
werden, wähi
den übrigen
160—170
gleich 200 v

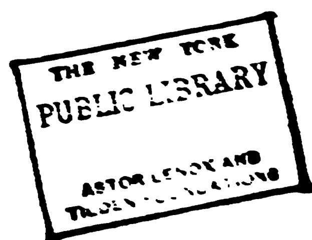
Ausser de
maschine ba
schinenfabrik
noch eine Re
Gleichstrom
welche entwe
chen Zwecke
bestimmte
wendung fin

Fig. 276
kleineren 2 p
tor mit eine
Magnetspule
den beiden
das eine dire
Gestelle ver
andere Lager
Bronze. Di
ist als g
Grammering
eine Anwend
in Frankreic
beliebt ist.

Fig. 27
ben verschie
ten und Sc
solchen Ma
direkte Ku
einer Laval

Jede der beiden Maschinen liefert einen Strom von
und 80 Volt bei 1500 Touren. Die Magnete sind mit einer





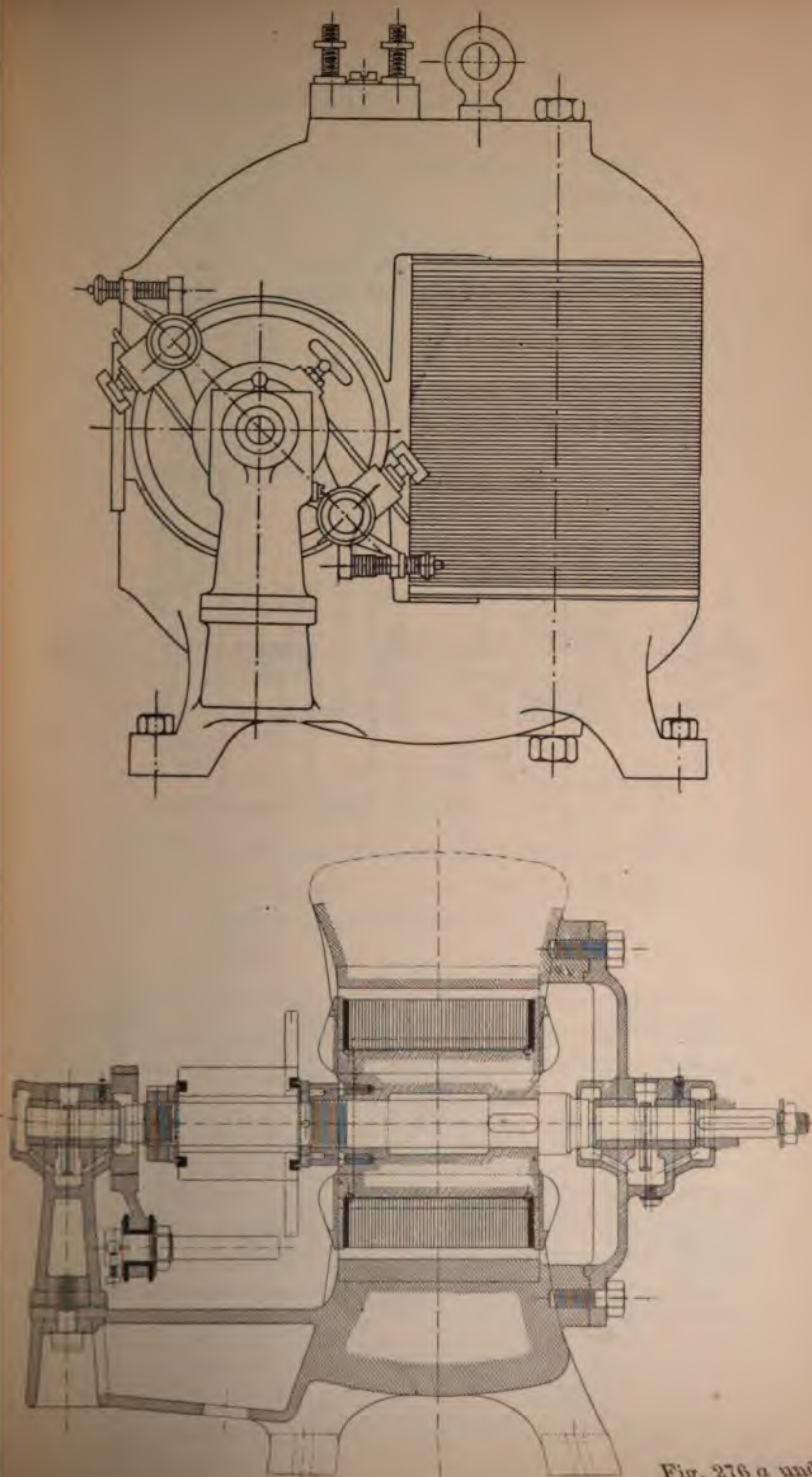


Fig. 276 a und b.

wicklung versehen. Die elektrischen Daten dieser Maschine sind nachstehende:

Armaturdurchmesser	$D =$	31 cm,
Armaturlänge	$l =$	23 „
Drahtzahl	$N =$	104,
Anzahl Kommutatorsegmente	$N_2 =$	52,
Querschnitt der Armaturkabel	$=$	35 mm².

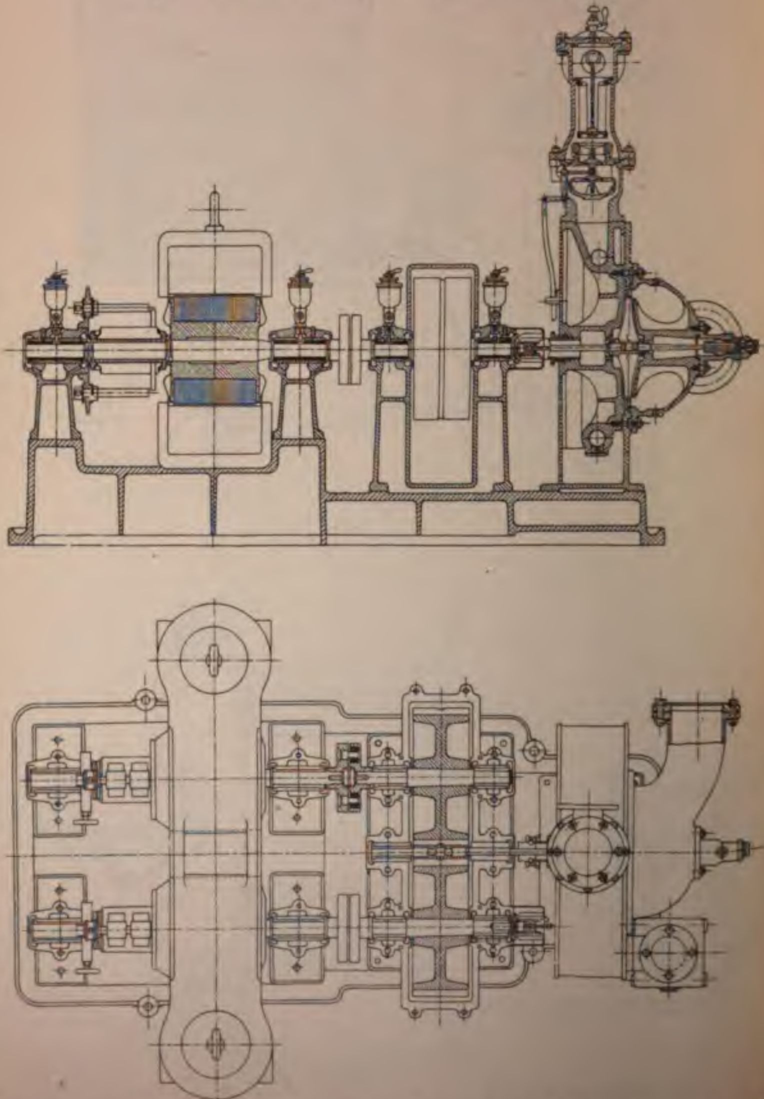


Fig. 277 *a* und *b*. Maison Breguet: Dynamo mit Lavalturbine gekuppelt.

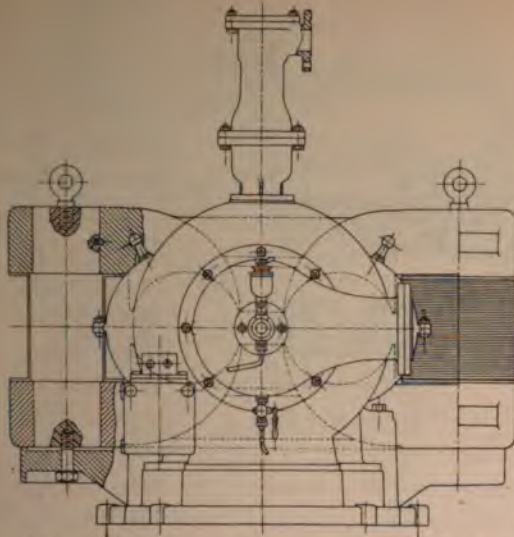


Fig. 277 c. Maison Breguet: Dynamo mit Lavalturbine gekuppelt.

Die Spannung variiert sehr wenig mit der Belastung und zwar beträgt sie

bei 0	58	126	205	400	Ampère
81	81,5	82	81,5	80	Volt.

Die Messung des Isolationswiderstandes gegen die Masse ergab

für die	Armaturen	9—10	Megohm,
„ „	dünne Magnetwicklung	0,1	„
„ „	dicke „	1	„

Die angegebenen Zahlen sind übrigens keine Konstanten, da der Isolationswiderstand ungemein variabel ist und gewöhnlich nach einiger Betriebsdauer, falls keine eigentlichen Isolationsfehler vorhanden sind, bedeutend zunimmt.

Eine zweite Maschine für direkte Kupplung zeigen die Fig. 278 *a* bis *c*. Das 2teilige Magnetgestell besitzt 4 Pole und 2 Magnetspulen. Um die Zahl der Bürstenstifte auf zwei zu reduzieren, ist die Ringarmatur mit Seriewicklung versehen, wobei die einzelnen Spulen durch die am Kommutator angebrachten Gabeln untereinander verbunden sind.

Die Daten dieser Maschinen sind wie folgt:

$J = 300$ Amp.;
$E = 82$ Volt;
$n = 350$
$D = 52$ cm $D_1 = 38$, $l = 30$, $\delta = 2$.

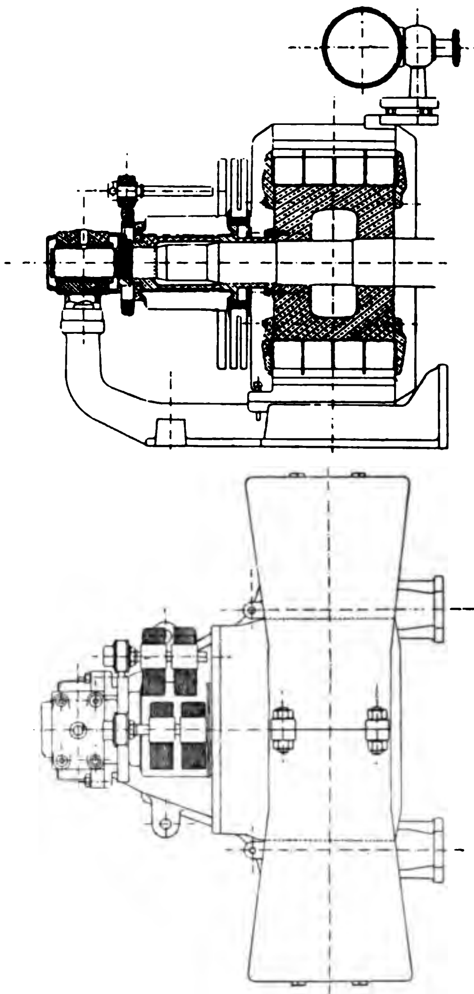


Fig. 278 *a* und *b*. Maison Breguet.

Während die Breguetmaschinen bis zu 22 *KW* ausschliesslich Ringanker besitzen, findet sich bei grösseren Maschinen Trommel- und Ringwicklung vor.

Von den Maschinen der Cie. de Fives-Lille in Givors, welche die französischen Patente der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin ausbeutet, sollen hier nur die Generatoren der Station Edison im Faubourg Montmartre in Paris erwähnt werden. Dieselben bieten noch besonderes Interesse, da sie nach dem auf S. 251 beschriebenen Dreileitersystem gebaut sind.[1])

Jede Maschine liefert eine Spannung von 2×150 Volt mit einer Stromstärke von 1330 Amp. bei 300 Touren.

Die speziellen Konstruktionsdaten sind folgende:

Armatur: mit halbgeschlossenen Nuten.

$D = 173$ cm $\qquad D_1 = 120$ cm

$l = 45$ cm

$N = 400$ (Mordeyschaltung)

$p = p_1 = 4$

$$\Phi = \text{ungefähr } \frac{(290 + 20)\ 60 \cdot 10^8}{400 \cdot 300} = 15\,500\,000.$$

[1]) Siehe M. P. Girault, Eclairage Electr., Januar 1898.

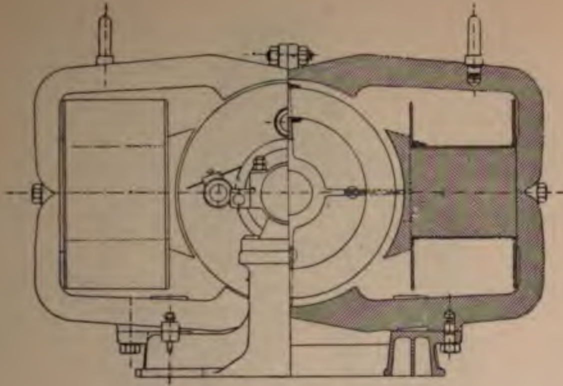


Fig. 278c. Maison Breguet.

Die Leitungen, welche die Mitten der verschiedenen Verbindungsgabeln auf der Kommutatorseite mit den Kommutatorlamellen verbinden, sind aus Nickelinband gebildet, um der in Kommutation befindlichen Spule einen gewissen Widerstand zu geben. Obwohl dieser Zusatzwiderstand relativ beträchtlich ist, verglichen mit dem Widerstande einer einzigen Spule, ist er doch dem inneren Widerstande der Armatur gegenüber gering.

Magnete: Widerstand der 8 Spulen in Serie 46 Ω. Das Magnetgestell ist aus Stahlguss.

Die Ausgleichspule, welche viel Ähnlichkheit mit den früheren Zipernowskytransformatoren hat, ist aus Eisenscheiben gebildet, welche mittelst isolierten Bolzen zusammengehalten werden.

Bei der Maschine von Couffinhal in St. Etienne (Fig. 281 *a* und *b*) ist dem Einflusse der Querinduktion durch vollständige Trennung der Magnete begegnet. Zu diesem Zwecke sind zwischen je zwei Magnethälften Bolzen aus Messing eingeklemmt.

Es liesse sich darüber diskutieren, ob die damit erreichten Vorteile in richtigem Verhältnisse zu den erhöhten Arbeitskosten stehen. Es ist zunächst zu bemerken, dass die Querinduktion eben nur in dem Maasse abnimmt, als der magnetische Widerstand dieser Linien vergrössert wird. Nun ist im allgemeinen der Übergangsquerschnitt sehr gross, wie schon die Fig. 281 *b* zeigt. Die Luftdistanz muss infolgedessen ebenfalls sehr gross sein und zwar viel grösser als man sich gewöhnlich vorstellt, da sonst die damit bewirkte Verbesserung der Maschine kaum nennenswert ist. Als ein Fehler muss es ebenfalls bezeichnet werden, dass sich die Magnethälften an den Polflächen be-

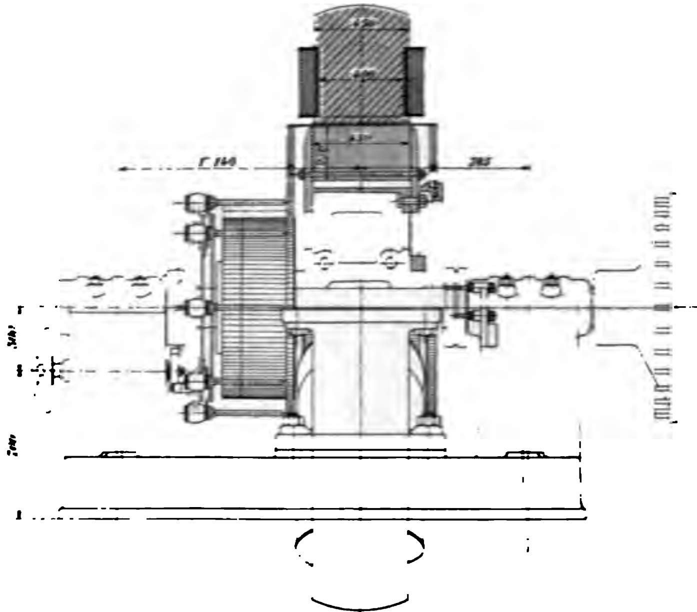


Fig. 279 a. Cie. Fives-Lille: 400 *KW* Dynamo für Dreileitersystem.

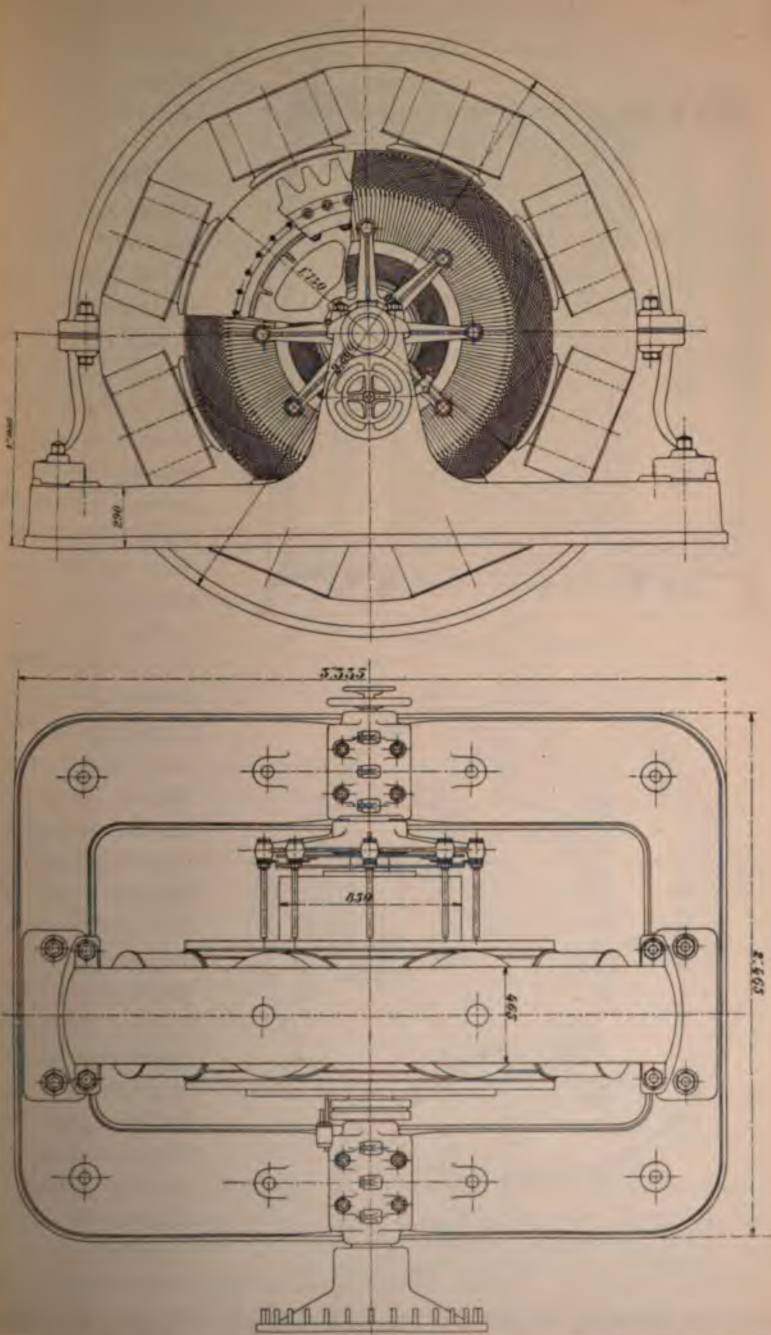
rühren und somit eine magnetische Brücke bilden von verhältnismässig geringem magnetischem Widerstande.

Dynamomaschinenfabrik Fritsche & Pischon, Berlin.

Die Maschinen dieser Firma zeichnen sich ohne Ausnahme durch ihre Originalität aus. Sehr bekannt ist hauptsächlich die sogenannte „Radanker"-Maschine, welche ihren Namen von der eigentümlichen Form des Scheibenankers erhalten hat.

Der Gedanke der Scheibenarmatur ist zwar keineswegs neu, indem schon Paccinotti 1875 eine derartige Maschine entworfen hatte. Überdies sind inzwischen eine Reihe von Patenten aufgetaucht, worunter diejenigen von Jehl & Rupp, Edison & Desrozier die bekanntesten sind. Die Scheibenarmatur hat insofern von der gewöhnlichen Armatur einen Vorteil voraus, als der Eisenkern der Armatur vollständig wegfällt, sodass das Gewicht bedeutend verringert wird. Allen den genannten Systemen haftet jedoch der Mangel an Solidität an, wozu noch das grosse Kupfergewicht der Magnete hinzutritt, infolge des grossen Luftwiderstandes.

Diese Fehler, welche bisher die Anwendung der Scheibenarmaturen sehr erschwerten, ist bei der Konstruktion von Fritsche auf ingenieuse *Weise abgeholfen*, so dass seine Maschine in ihrer gegenwärtigen



9 *b* und *c*. Cie. Fives-Lille: 400 *KW* Dynamo für Dreileitersystem.

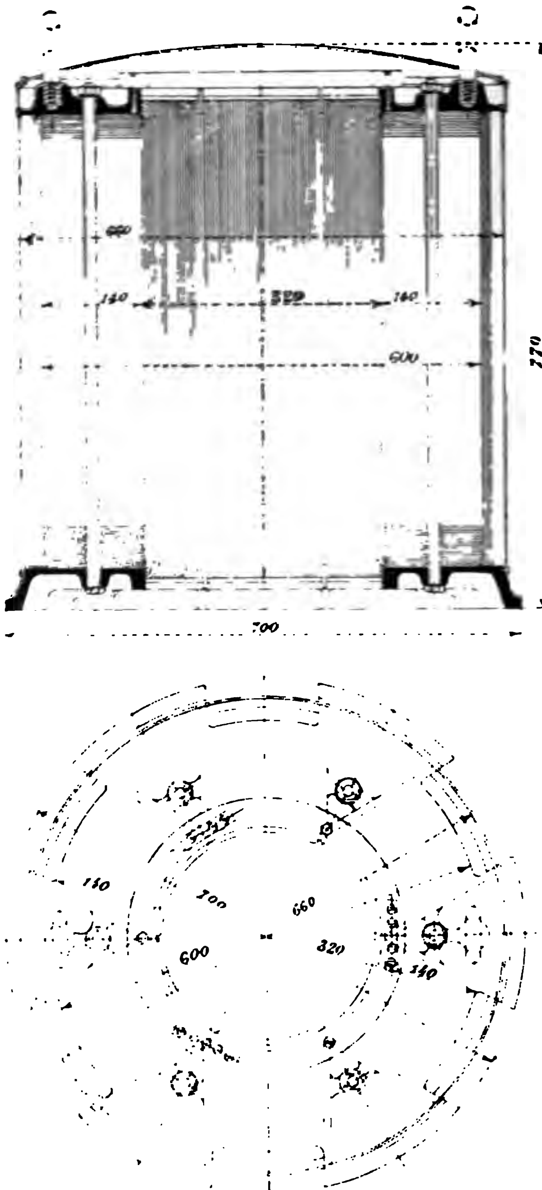


Fig. 280 a und b. Cie. Fives-Lille: Ausgleichspule für Dreileiter-Dynamos.

Form vorteilhaft mit den gewöhnlichen Maschinentypen verglichen werden kann.

Das Charakteristische der sogenannten „Radankerdynamo“ System Fritsche D.R.P. 57070 (16. April 90) besteht darin, dass die Armatur in Form eines Rades ausgeführt ist, dessen Speichen durch die induzierten Stäbe gebildet werden, während der Radkranz als Kommutator ausgebildet ist. Während nun bei den eingangs erwähnten Scheibenarmaturen die Wicklung stets in zwei Ebenen vorgesehen ist, wodurch der Luftraum ungemein vergrössert wird, befinden sich sämtliche induzierte Drähte der Maschine Fritsche in einer Ebene. Das betreffende Wicklungsschema weicht übrigens in keiner Weise von demjenigen der gewöhnlichen Trommelwicklungen ab. Man kann sich hiervon am besten ein Bild machen, indem man sich die in den bekannten Wicklungs-*emas senkrecht* zur Papierebene angenommenen induzierten Drähte

radial gestellt denkt und die hintern Verbindungen am Umfange vornimmt (siehe Fig. 34).

Die radialen Stäbe sind entweder alle oder ein Teil davon aus Eisen hergestellt, dies zum Zwecke, den magnetischen Widerstand der Luft zu verringern. Die Verbindung derselben untereinander geschieht mittelst dünner isolierter Kupferstreifen (Fig. 282), welche mit den Stäben vernietet und verlötet werden.

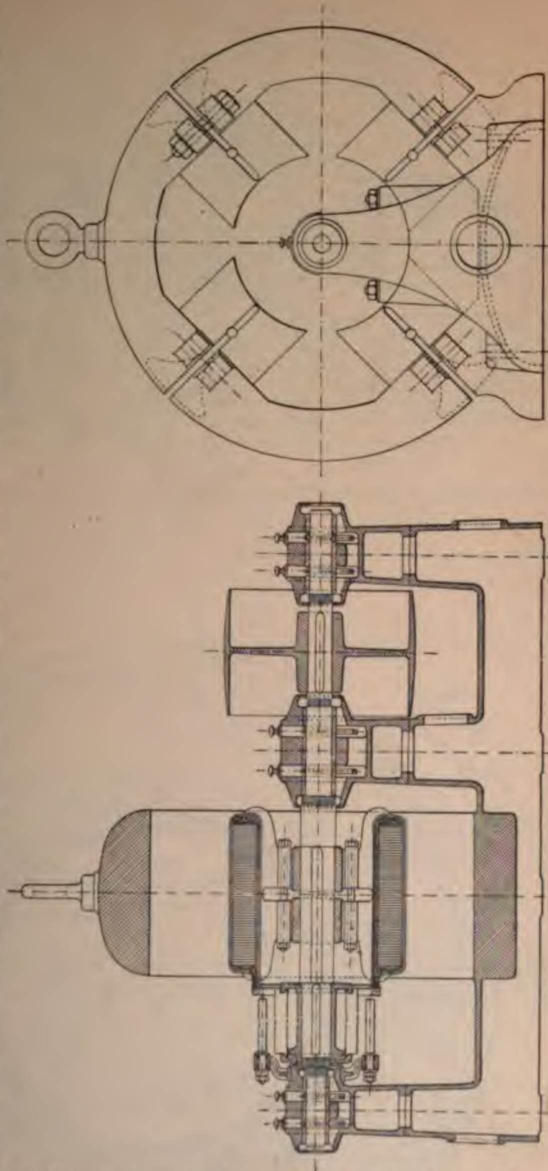
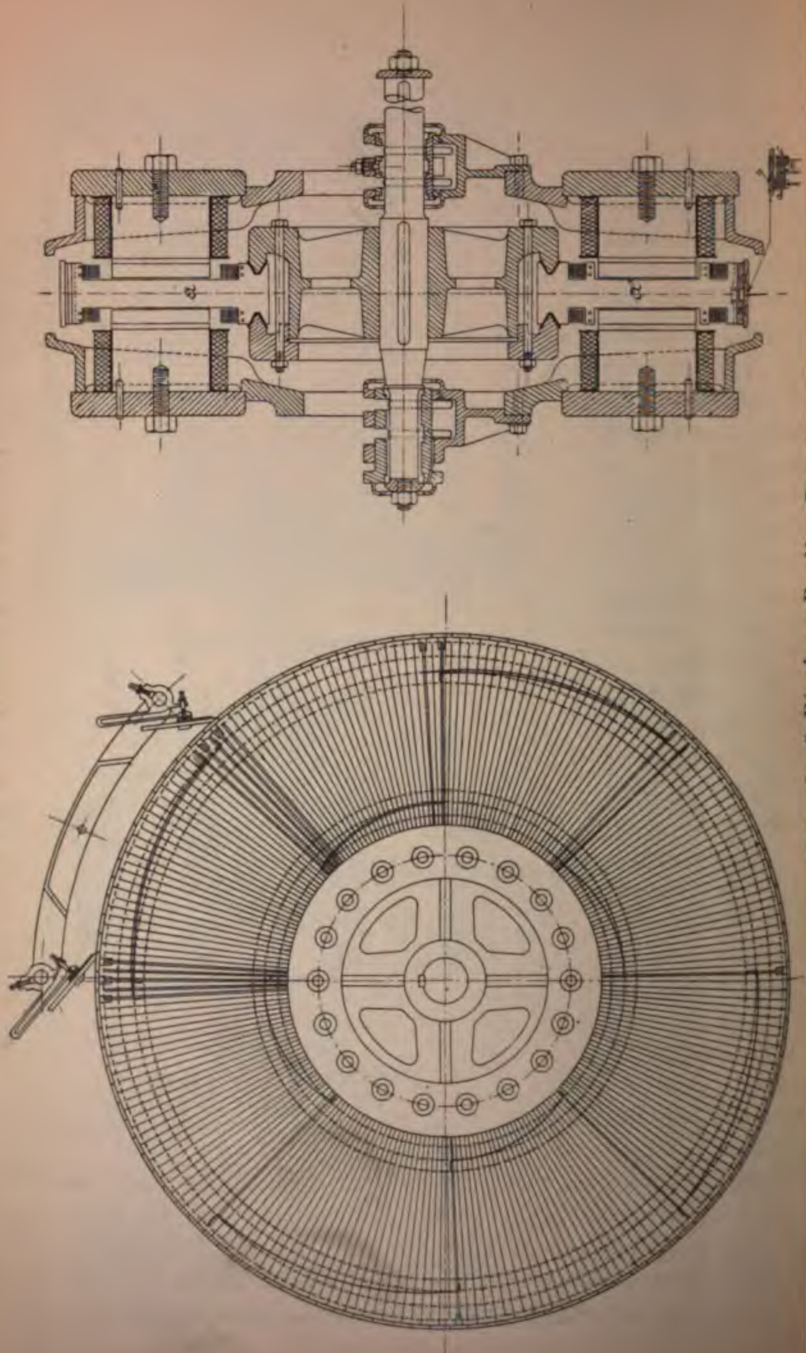


Fig. 281 *a* und *b*. Couffinhal in St. Etienne: Vierpoliger Type.

Alle ungeraden radialen Stäbe laufen in ein angenietetes Messingstück *a* aus, auf welches die Kommutatorsegmente geschraubt werden; die geraden Stäbe werden durch eingeklemmte Isolierstücke *c* gehalten.

Der Armaturstern hat grosse Ähnlichkeit mit den Kommutatorbüchsen. Selbstverständlich müssen bei dieser Armaturkonstruktion die Lager derart disponiert werden, dass keine axiale Verschiebung der Armatur eintreten kann. Fig. 282 zeigt auch die eigentümliche Befestigung der Magnete, welche es ermöglicht, dieselben seitlich heraus zu nehmen.

Es mögen hier einige Angaben über solche Radankerdynamos folgen:



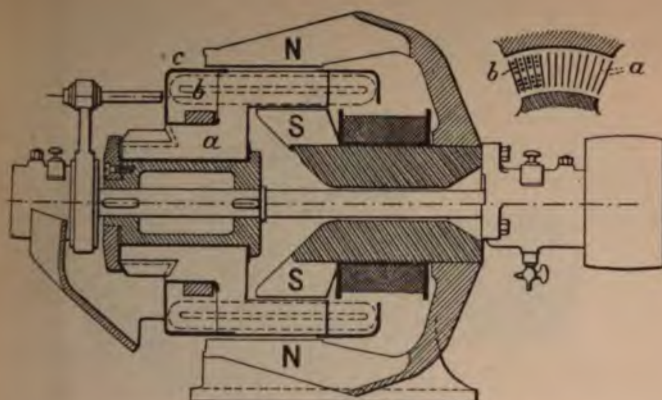


Fig. 283. Fritsche & Pischon: Glockenanker-Dynamo.

Type	*M*	*CL*	*C*
Volt	240	220	120
Amp.	270	160	180
Touren	135	130	180
serer Diam. Armatur	1880	—	1100
nmutatorbreite	230	—	—
höhe	210	—	—
anz der Pole	90	—	—
lzahl	10	—	8
ahl Stäbe	522	742 wovon die Hälfte aus Eisen	398
ensionen der radialen Stäbe. .	2 × 1,5 dick 80 breit	3 × 60 Eisen 1,5 . 30 Kupfer	— —
ensionen der Verbindungen . .	60 . 0,8	—	—
erstand Armatur	0,042 Ω	0,0707	—
„ Magnete	39,936	20,58	—
tion Armatur . . . . „ Magnete	} 11 Megohm	11 Megohm	—
peraturerhöhung			
der Armatur	22,5° C.	17° C.	—
„ Magnete	10°	21° C.	—
o Gewicht der Armatur . . .	2250 kg	680 kg	560 kg
o-Gewicht der kompl. Maschinen	6600 kg	2900 kg	2700 „

Eine ebenso originelle Konstruktion wie die oben beschriebene amo, präsentiert Fritsche's „Glockenarmatur“, D.R.P. 78075

(20. Mai 1893), wovon Fig. 283 eine Schnittzeichnung
Sämtliche Pole am Umfange haben gleiche Polarität.

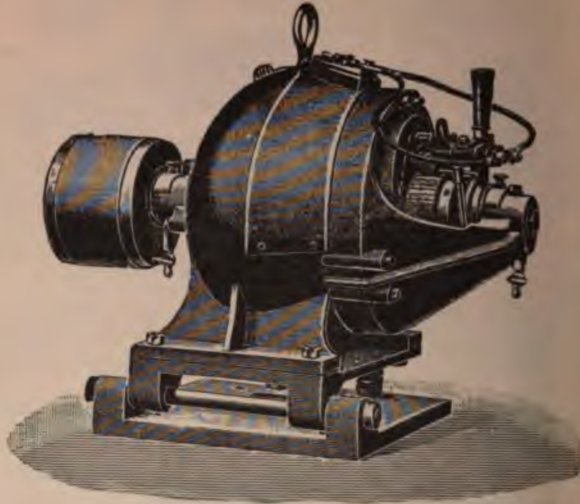


Fig. 284.

regung dient eine einzelne Spule. Die Armaturwicklung aus
ist mittelst einer Schablone ausgeführt und gegen das Her

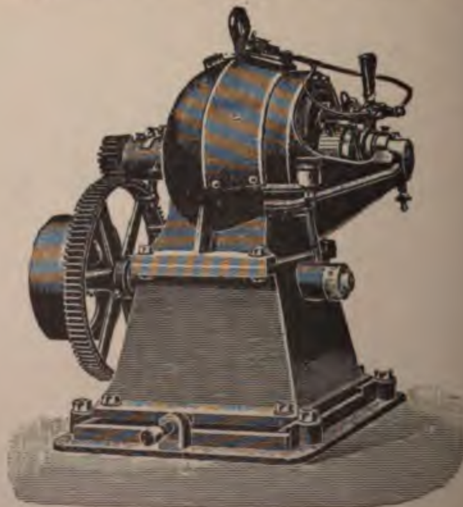
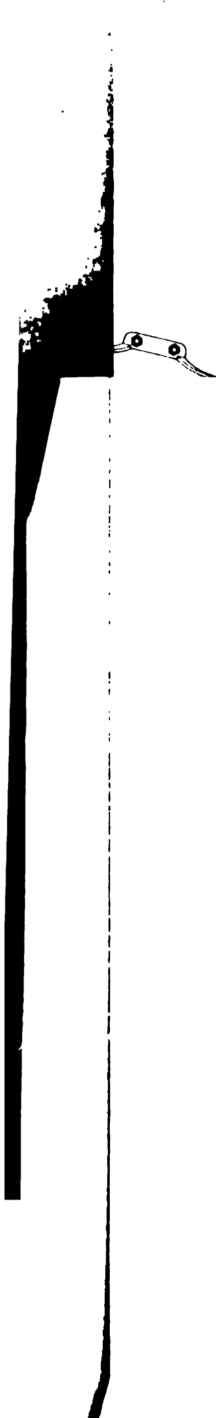
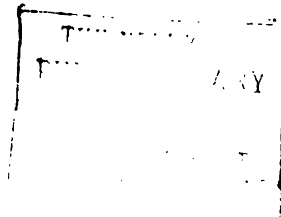
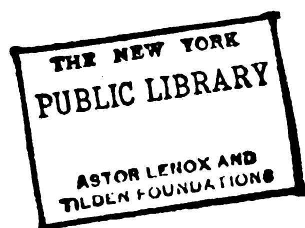


Fig. 285.

durch 2 Schilder *c* gehalten. Um den Luftwiderstand zu
sind hier zwischen die Spulen schmiedeeiserne Stege
an welche die Armatursegmente angeschlossen werde






THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS

hat schliesslich die Bestimmung, die Stege gegen die Einwirkung der Centrifugalkraft zu schützen.

Fig. 284 und 285 geben zwei äussere Ansichten dieses Motors mit oder ohne Vorgelege.

Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vormals Schuckert & Co. Nürnberg. Diese Maschinenfabrik war vielleicht die erste, welche den Bau von Flachringdynamos mit seitlichen Polen aufnahm (1876). Obwohl sie gegenwärtig auch andere Maschinen baut, bilden Flachringmaschinen immer noch ihre Spezialität. Die Flachringdynamo besitzt den Vorteil, dass der Luftabstand des Armatureisens von den Polen durch die Ausbiegung der Armaturwelle nicht beeinflusst wird. Überdies fällt der Durchmesser des Magnetkranzes geringer aus, und die Konstruktion des Armaturkernes wird bedeutend vereinfacht. Diesem Vorteile steht der höhere Preis des Eisenbandes gegenüber, das sich z. B. bei Breiten von 30 cm auf —.80 Cts. pro kg stellt, während gewöhnliches Eisenblech nur 35—40 Cts. kostet. Auch hält es schwer, bei grösseren Breiten noch Eisenband von genügender Länge aufzutreiben und ist die Qualität mit Bezug auf den Hysteresisverlust unter allen Umständen geringer.

Bei den Flachringmaschinen ist die Grammewicklung *a priori* geboten.

Fig. 286 *a* bis *c* geben verschiedene Schnitte des Types *JL* 18 für direkte Kupplung. Die betreffende Maschine ist für die Centralstation in Hannover ausgeführt.

Die Daten dieser Maschine sind wie folgt:

$E =$ 250 Volt,
$J =$ 1600 Amp.,
$n =$ 110 pro Min.

Polzahl = 14,
Bürstenzahl = 6 (Mordeywicklung),
Mittlerer Armaturdurchmesser = 260 cm,
Eisenhöhe = 50 „
Eisenbreite = 19,6 „
Drahtzahl $N =$ 1120,
Lammellenzahl $N_2 =$ 1120.

Elektrizitäts-Gesellschaft Siemens & Halske, Berlin.
Wir haben bereits bei verschiedenen Anlässen die Verdienste dieser Maschinenfabrik um die Entwicklung der Dynamomaschinen erwähnt.

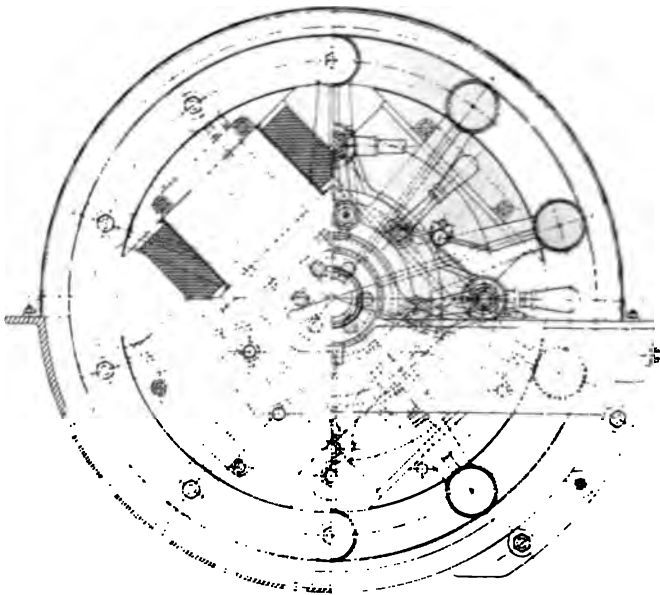


Fig. 287a. Siemens & Halske: Innenpolmaschine.

(Prinzipe der selbsterregenden Maschinen, Trommelwicklung etc.). Von den verschiedenen Gleichstrommaschinen dieser Gesellschaft ist durch seine zahlreichen Ausführungen am bekanntesten der Type *J*, bei welchem die Pole auf der inneren Seite der Armatur angebracht sind. Diese Maschinengattung eignet sich vorzugsweise für direkte Kupplung und besitzt ausser ihrer kompakten Form den Vorteil sehr geringen Gewichtes. Der Grund hierfür liegt einerseits darin, dass die Armatur äusserst günstig ausgenutzt wird, und ferner wird dadurch die Kraftlinienlänge und das Kupfergewicht der Magnete auf ein Minimum beschränkt. Auch muss bemerkt werden, dass der begrenzte Raum, welcher für die Unterbringung der Magnetwicklung zur Verfügung steht, im allgemeinen die Verwendung von Stahlguss vorschreibt, wodurch das Totalgewicht zum Vorneherein sehr vermindert wird.

Da diese Maschinen in der Regel für direkte Kupplung mit Dampfmaschinen benutzt werden, wird ein besonderes Gestell entbehrlich und es können die Magnete direkt mit dem Gestell der Dampfmaschine verschraubt werden.

mens und Halske führen diesen Type nach zwei Arten aus mit besonderem Kommutator, wie die Fig. 287a bis c zeigen,

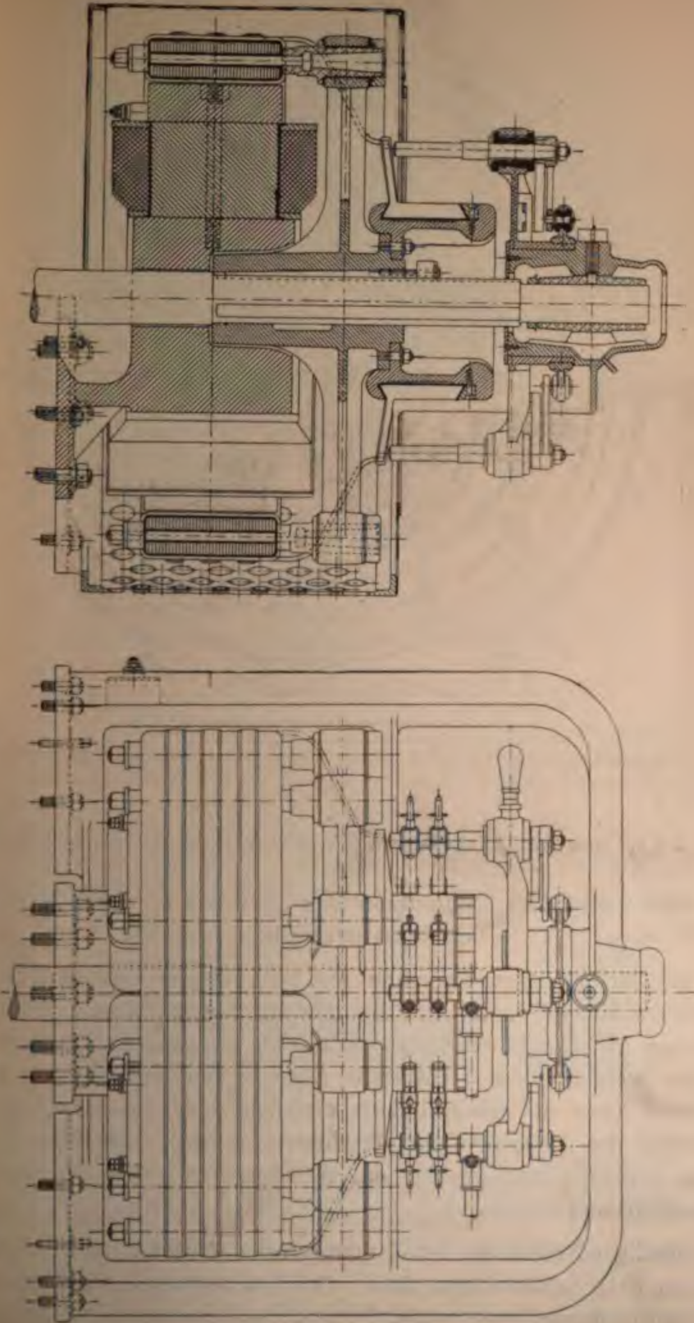


Fig. 287 *b* und *c*. **Siemens & Halske:** Innenpolmaschine.

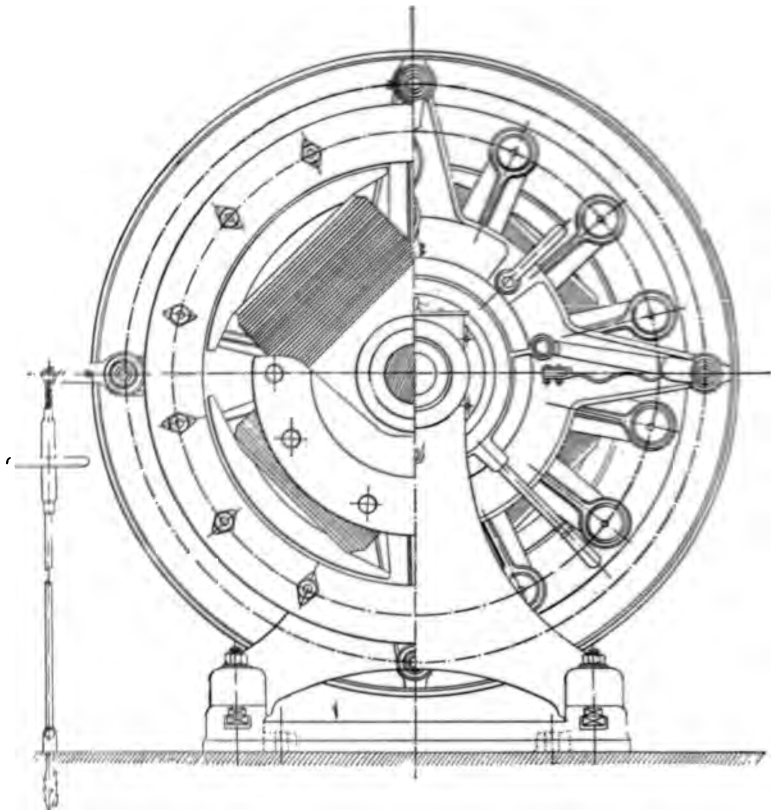


Fig. 288 *a*. Société Alsacienne (Siemens & Halske): Innenpolmaschine.

oder ohne besonderen Kommutator Fig. 288*a* und *b*, wobei die Bürsten auf die äusseren Teile der Armaturwicklung schleifen.

Bei der kleineren Maschine Fig. 287, welche sich hauptsächlich zu Marinezwecken eignet, ist das äussere Lager fliegend angebracht und bildet gleichzeitig ein Schutzgehäuse für die Armatur. Die Armaturscheiben werden durch 10 isolierte Bolzen zusammengehalten, welche an einem Ende mit Bronzehülsen versehen sind, die isoliert mit den 10 Armen des Armatursterns verschraubt werden. Die Bronzehülsen dienen lediglich dem Zwecke, das Armatureisen gegen den Gussstern magnetisch zu isolieren.

Die Eigentümlichkeit der Kommutatorkonstruktion haben wir bereits im Kap. VIII S. 289 besprochen. Die Verbindung der gleichnamigen Bürstenstifte untereinander erfolgt durch Kupferbarren, die in Holzleisten eingelegt sind. Noch sei erwähnt, dass alle Maschinen mit einer

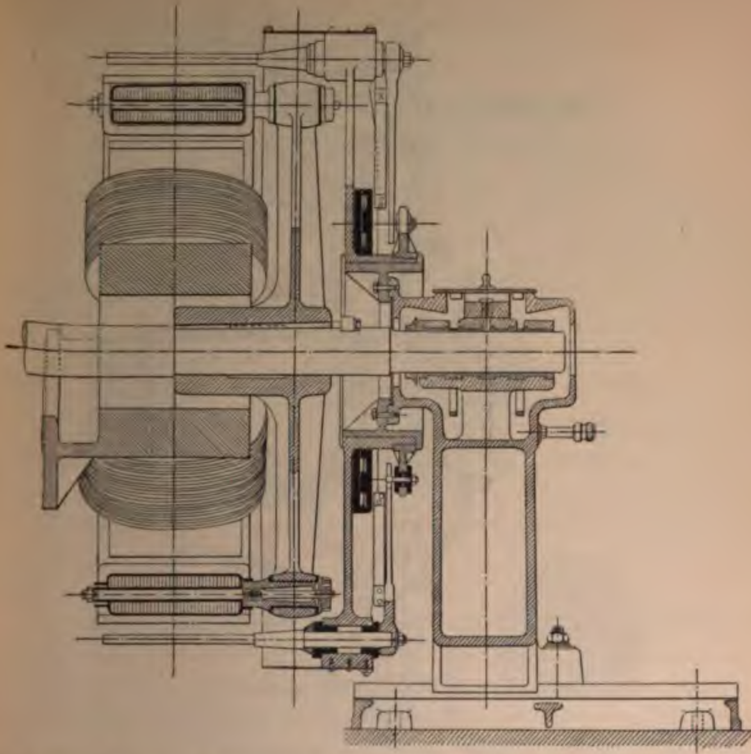


Fig. 288*b*. Société Alsacienne (Siemens & Halske): Innenpolmaschine.

speziellen Vorrichtung versehen sind, um die Bürsten beim Anlassen und Abstellen der Dampfmaschine abheben zu können, sodass eine Beschädigung der Bürsten bei allfälligem Rückwärtslaufen ausgeschlossen ist.

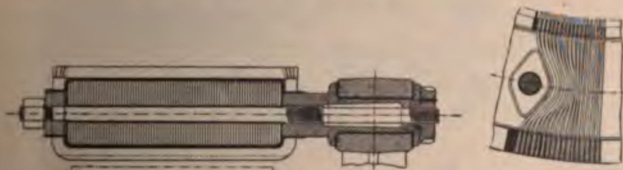


Fig. 289.

Fig. 288 und 289 geben verschiedene Schnitte und Details einer Innenpolmaschine für 46 Kilowatt, ausgeführt von der Société Alsacienne de Constructions Mécaniques in Belfort, welche die Konzession für die Siemen'schen Patente in Frankreich erworben hat. Bei dieser Maschine ist der Kommutator durch die Armaturwicklung gebildet.

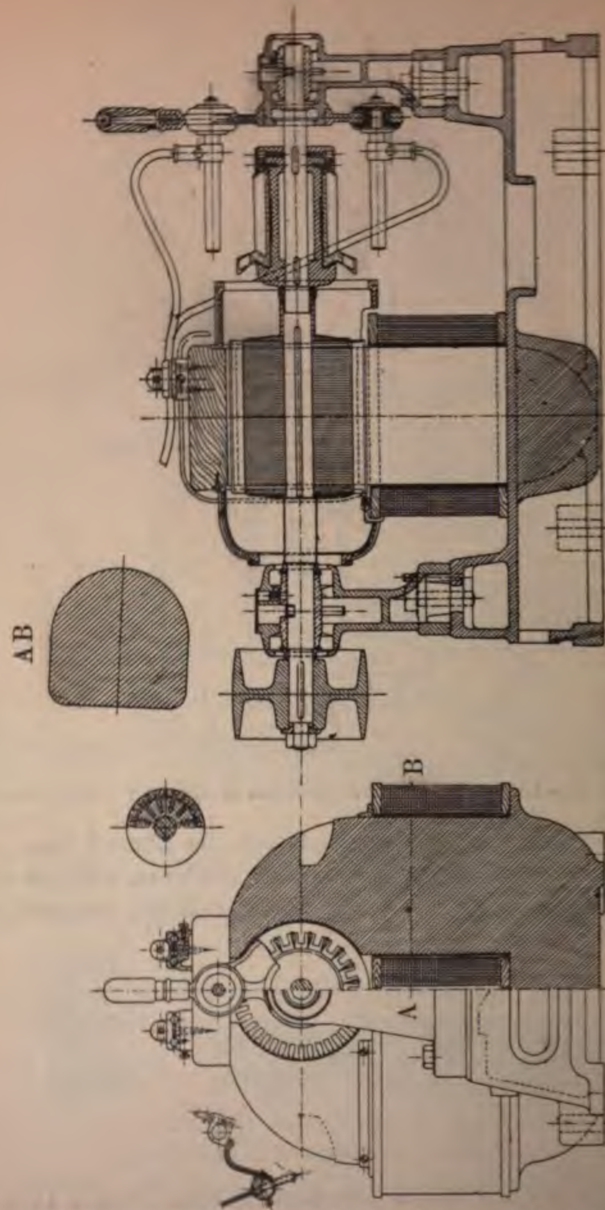


Fig. 290 *a* und *b*. Siemens & Halske: Zweipoliger Type.

Die elektrischen und konstruktiven Daten sind aus der n
stehenden Zusammenstellung ersichtlich:

$$E = 275;$$
$$J = 350;$$
$$n = 210.$$

[redacted]

Armatur: (14 Bolzen von 2,3 cm Durchmesser)

$D = 138$ cm, $l = 35$ cm,

$D_1 = 117$ „ $N = 840$ „

$s = 100$ mm² am Umfange und

$= 45$ mm² für die innere Wicklung;

Widerstand von Bürste zu Bürste $= 0{,}016\ \Omega$.

$\Phi = 10000000$,

$B_a = 15600$.

Magnete: (aus Stahlguss)

$S_m = 75 \times 35$ cm²,

$\delta = 3$ cm,

Widerstand der Magnete 42 Ω.

Die grossen Vorteile der Innenpol-Maschinen mit Bezug auf das Gewicht haben in Deutschland verschiedene Konstrukteure veranlasst, diesen Type zu adoptieren, unter anderem Gebr. Naglo in Berlin und C. & E. Fein in Stuttgart. Höchst wahrscheinlich ist derselbe zum ersten Male von der Firma Ganz & Co. in Budapest gebaut, doch seither wieder aufgegeben worden.[1])

Die soeben besprochene Ausführung ohne besonderen Kommutator mag vielleicht auf den ersten Blick einige Bedenken erregen, da die Gefahr eines Umrundlaufens des Kommutators sehr nahe liegt. Es scheint jedoch, dass dieser Einwurf, gestützt auf mehr als 10jährigen Beobachtungen, ungerechtfertig ist, was wohl zumeist der grossen Routine der mit dieser Fabrikation betrauten Arbeiter zuzuschreiben ist. Im übrigen ist einleuchtend, dass bei solchen Maschinen schon wegen der Bürstenabnutzung bedeutend geringere Umfangsgeschwindigkeiten zur Anwendung kommen als dies gewöhnlich der Fall ist.

Zum Schlusse mag noch eine kleinere 2polige Maschine Type *LH* 5 mit Trommelwicklung folgen. (Fig. 290 *a* und *b*).

Die Daten dieser Maschine sind nachstehende:

$E = 150$,

$J = 25$,

$n = 1050$,

$D = 18$ cm, $l = 20$ cm,

$N = 960$ in 40 Nuten verteilt,

$N_2 = 20$.

Der Kommutator besitzt ausser der bereits auf Seite 289 erwähnten eigentümlichen Konstruktion auswechselbare Lamellen. Um die Armatur gegen äussere Einflüsse zu schützen, ist dieselbe mit einem Schutzkorbe versehen.

---

[1]) Siehe *Lumière Electr.* 37, vol. II, S. 182.

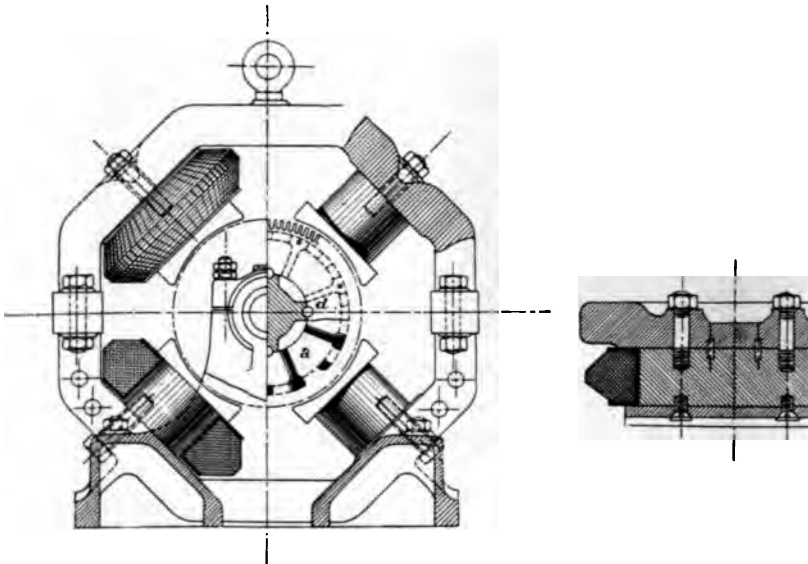


Fig. 291 *a* und *b*.

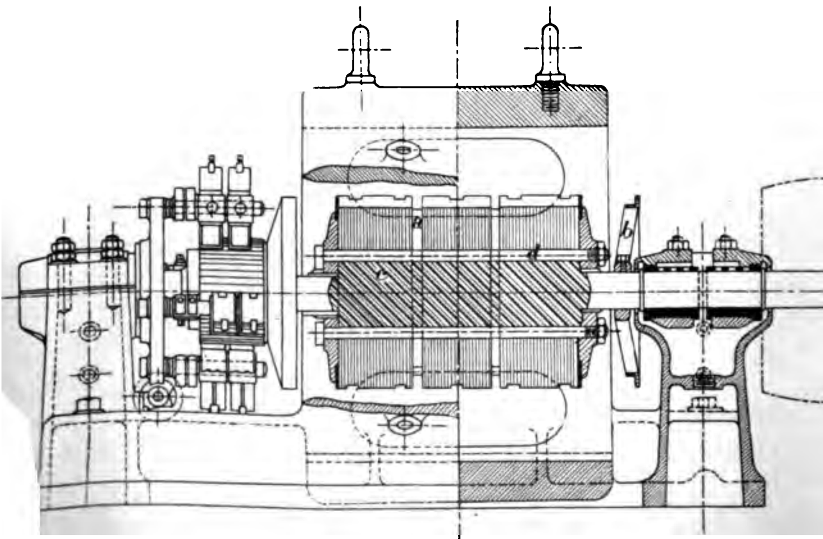


Fig. 291 *c*. Easton, Anderson & Co., Erith: **Normaltype.**

Hält man unter den englischen Fabrikaten **Rundschau,** s
[illegible] sehr grossen Vorliebe für den **2 poligen Hufeisen**
[illegible] **htstehenden, teils in seiner umgekehrten Ausfüh**



Fig. 291 *d*.

(Edison & Hopkinson). Diese Vorliebe erklärt sich wohl einzig durch die beispielslose Billigkeit der Rohmaterialen, welche es ermöglicht, diesen Type noch bei grösseren Maschinen ohne allzugrossen Einfluss auf den Preis zu verwerten.

Die Easton, Anderson & Co. in Erith (Chefingenieur Herr V. A. Fynn) ist die einzige englische Firma, welche ausschliesslich mehrpolige Maschinen baut und zwar von

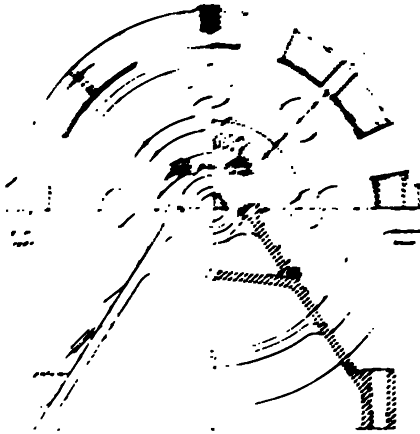
$^3/_4$ *KW* bei 2500 Touren bis 110 *KW* bei 600 Touren 4polig
bis 200 *KW* 6polig und darüber 8 und mehrpolig.

Die Konstruktion der 4 poligen Modelle geht aus Fig. 291 *a* bis *d* hervor, welche sich auf eine 50 *KW* Maschine beziehen.

Die Armatur ist mit einer Mantelwicklung versehen, zu deren Befestigung 2 Hilfssterne dienen. Besonderes Interesse verdienen die Lager mit Kettenschmierung und die Welle, welch' letztere auf dem Kontinente wohl etwas schwieriger zu beschaffen wäre.

Ausser dieser, als normal angesehenen Konstruktion, baut die genannte Firma auch sogenannte „Gleichpolige" Typen, welche hauptsächlich als Motoren oder als Erregermaschinen für Wechselstromgeneratoren Verwendung finden. Wir haben bereits bei der Besprechung der Maschinen von Thury diese Maschinenform kennen gelernt. Der Unterschied zwischen jener Konstruktion und derjenigen von V. A. Fynn besteht darin, dass bei der letzteren 2 Armaturen vorhanden sind, wie aus Fig. 292 und 293 hervorgeht.

[illegible]



[illegible] für Bogenlichtmaschinen [illegible] wenn man die Wicklung so wählt, dass die [illegible] unter den Polen stattfindet. Wie ersichtlich, ist bei [illegible]

Fig. 292 b.

[illegible] für die Bürstenverschiebung nutzbare Polbogen ausserordentlich [illegible], ohne dass dies eine entsprechend starke Streuung im Gefolge hätte.

Der in Fig. 292 *a* bis *c* dargestellte Type betrifft eine Dynamo von 715 Volt und max. 35 Amp. bei 1300 Touren.

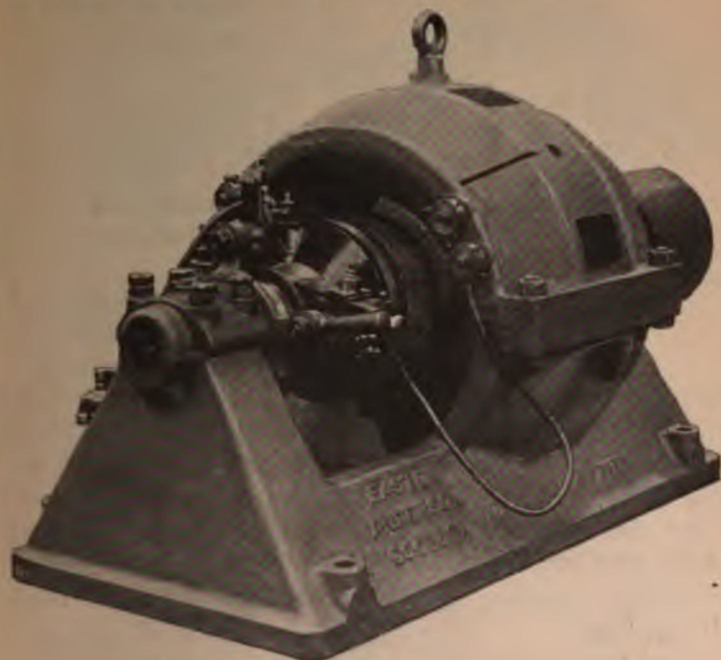


Fig. 292 *c*.



Fig. 293.

Anzahl Drähte auf der Armatur = 97 × 4 = 388,
Anzahl Kommutatorlamellen = 97,
Durchmesser der Armatur = 30,4 cm,
Länge einer „ = 13,5 „
Einfacher Luftabstand = 0,2 „

Die Bürstenverschiebung ist selbstverständlich sehr gering infolge der starken Änderung der Feldintensität am Umfange der neutralen Zone und beträgt ca. 2° für Kupferbürsten. Bei Anwendung von Kohlenbürsten ist die Verschiebung praktisch gleich Null und es erfolgt eine funkenlose Kommutation, solange der Strom 35 Amp. nicht übersteigt.

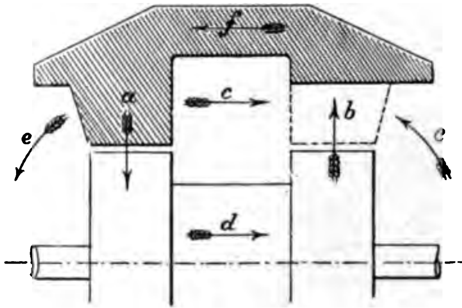


Fig. 294.

Die Erregung ist ausserordentlich klein (0,44 %). Nach den Angaben des Konstrukteurs würde die genannte Maschine voraussichtlich noch mehr leisten, wenn die Lamellenzahl erhöht würde. In der That scheint der Kommutator nach der auf Seite 292 angegebenen Regel zu knapp bemessen zu sein.

Eine Beschreibung einer kleineren Maschine dieses Systems von 140 Amp., 60 Volt und 800 Touren findet sich im Electrician (23. Juli 97). Die betreffende Maschine hatte einen Armaturdurchmesser von 28 cm bei 13 cm Länge.

Anzahl Kommutatorsegmente = 61.
„ Drähte $= 2 \times 61 = 122$.
Einfacher Luftabstand = 0,16 cm.

Die Bürstenverschiebung war hier ebenfalls sehr gering und erforderte eine gewisse Sorgfalt um einen vollständig funkenlosen Gang zu erzielen. Im übrigen liess sich bei Anwendung von Kohlenbürsten eine merkliche Verbesserung erzielen und es konnte die Maschine in diesem Falle sogar bedeutend überlastet werden.

Es mögen hier einige Daten über die Grösse der Streuung Platz finden.

Nehmen wir die Kraftlinienzahl im Querschnitte f (Fig. 294) gleich 1 an, so verteilt sich dieselbe über die übrigen Querschnitte wie folgt:

$a = 89,70\ \%$	$f = a + b + c + e = 1$
$b = 4,12$	$d = a + b + e$
$c = 4,18$	
$e = 2,00$	

Die Streuung e und c ist natürlich verloren, ohne im übrigen weiteren Schaden anzurichten, dagegen bewirkt die Streuung b einen

direkten Spannungsabfall und folglich eine Verminderung der Leistung. Die nützliche Linienzahl ist folglich gleich $a - b$.

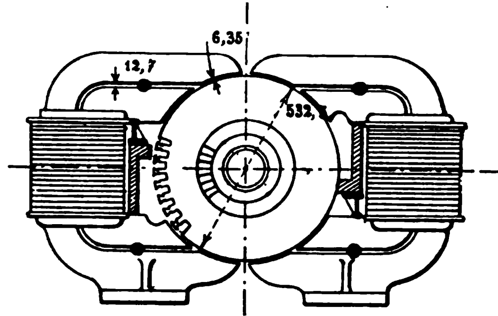


Fig. 295. Mavor & Coulson: Dynamo Syst. Sayers.

Mavor und Coulson in Glasgow bauen Dynamos mit Sayers'scher Wicklung, deren Eigentümlichkeit wir bereits Seite 233 besprochen haben.

Die Daten einer solchen Maschine für 80 KW (Fig. 295) sind nachstehend zusammengefasst und dürften in Anbetracht des aussergewöhnlich kleinen Gewichtes der betreffenden Maschine sehr lehrreich sein.

Leistung: $E = 100$ Volt,
$J = 800$ Amp.,
$n = 420$ Touren.

Armatur:	Äuss. Diam.	D	= 53,25 cm,
	Diam. des Fusskreises der Zacken =	D'	= 43,5 „
	Inn. Diam.	D_1	= 10,8 „
	Länge	l	= 53 „
	Nuten	N_1	= 72,
	Kommutatorsegmente	N_2	= 36,
	Hauptwicklung	N	= 72,
	Drahtquerschnitt	s	= 33,7 × 5 mm².

Jede der 72 Nuten enthält einen Draht der Hauptwicklung und 2 Drähte der Kompensationswicklung.

Magnete:

$$\Phi = \frac{(100 + 6) . 60\ 10^8}{72 . 420} = 20600000,$$

$$S_l = 51{,}6 . 53 = 2740,$$

$$B_l = \frac{20\,600\,000}{2740} = 7500.$$

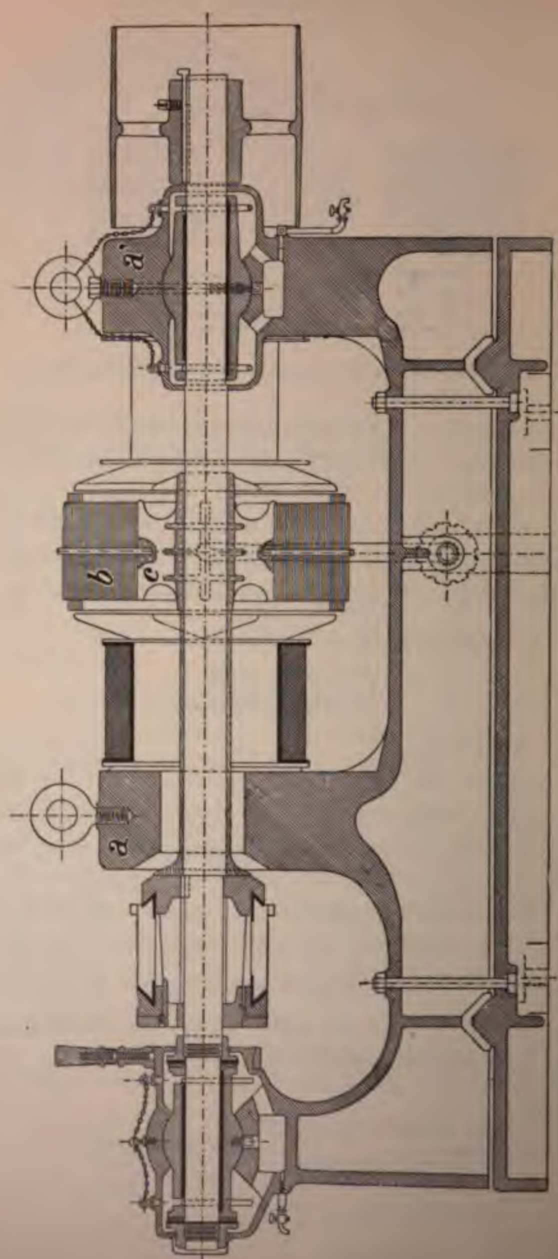


Fig. 296 *a*. **Brush Co., Cleveland: Zweipoliger Type.**

[redacted]

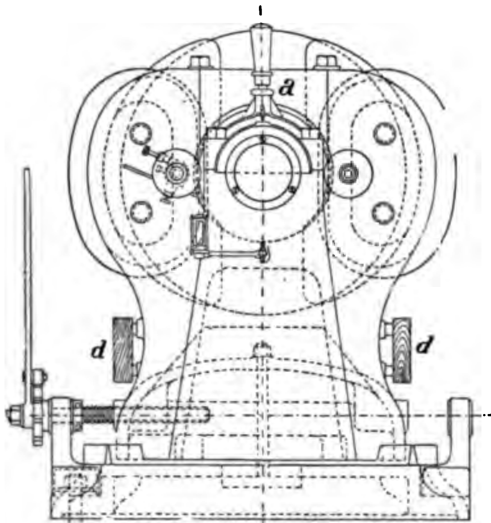


Fig. 296 *b*. Brush Co.: Zweipoliger Type.

Die Magnete sind durch 4 durch einen Luftraum von ca. 1,3 cm getrennte Stahlgussbügel gebildet. Da die Pole 120° umfassen und der einfache Luftabstand 0,635 cm beträgt, ergiebt dies eine Kraftlinienintensität der Armaturreaktion (S. 44)

$$B'_l = \frac{4\pi}{10} \cdot 72 \cdot \frac{800}{2} \cdot \frac{1}{2 \,.\, 0{,}635 + 3 \,.\, 1{,}3} = 7000 \text{ gegenüber } B_l = 7500.$$

Diese Rechnung ist allerdings nur approx. und es dürfte in Wirklichkeit B' kleiner als 7000 sein.

Windungen pro Magnet	=	1008,
Drahtdicke	=	2,77 mm,
Widerstand beider Spulen in Serie	=	10,7 Ohm.

Gewichte:

Magnete etc.	1817	kg,
Nebenschlussspulen	147,4	„
Armatur inkl. Welle und Kommutator, jedoch ohne Kupfer . . .	1061	„
Armatur Kupfer	246.6	„
Lager, Bürstenhalter u. s. w.. . .	191	„
Total	**3463**	kg.

Wenn man den englischen Fabrikanten im allgemeinen den Vorwacht, dass sie allzusehr den 2 poligen Maschinentype vorziehen,

so findet man in Amerika eine ausgesprochene Vorliebe für de
mehrpoligen und speziell 4 poligen Maschinentype nach dem Muster vo
Taf. II Fig. 25 u. 26. Eine Ausnahme von dieser Regel bilden die nac

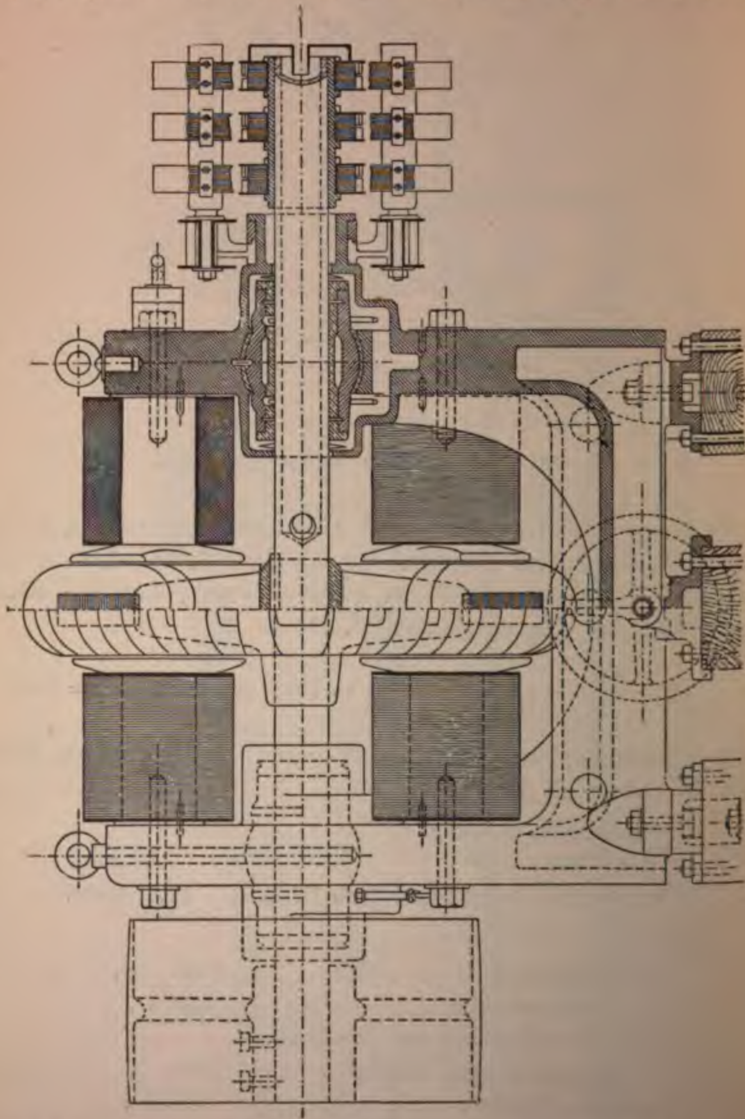


Fig. 297a. Brush Co.: Bogenlichtmaschine.

stehend beschriebenen Maschinen Fig. 296 und Fig. 297 der Brush Co. in Cleveland, O. Die erstere der beiden Maschinen bezieht sich auf einen Tramwaygenerator, die letztere stellt eine Bogenlichtmaschine dar (siehe S. 248.)

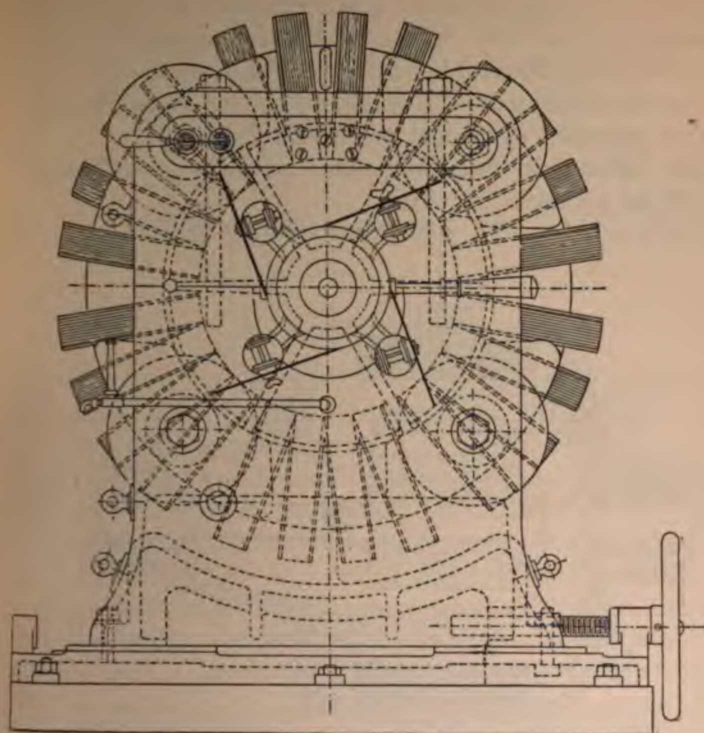


Fig. 297 *b*. Brush Co.: Bogenlichtmaschine.

Das charakterische der Brushmaschine liegt in der Flachringarmatur mit seitlich anliegenden Polen. Diese Anordnung erleichtert in hohem Grade das Demontieren der Armatur, indem es genügt, die Lagerdeckel und die verhältnismässig leichten Gussstücke *a* (Fig. 296) herauszunehmen, um die Armatur vollständig frei zu legen.

Der Armaturkern ist durch aufgewickeltes Kupferband gebildet, das durch radiale Bolzen gegen eine allfällige seitliche Verschiebung gehalten wird. Zu dem gleichen Zwecke ist die Welle mit Stellringen versehen.

Die Lager besitzen die in Amerika beliebten einstellbaren Lagerschalen, welche in diesem speziellen Falle ihre Berechtigung haben, während sie bei den gewöhnlichen Maschinen in der Regel entbehrlich sind.

In der That ist die zulässige Ausbiegung der Welle von Maschinen mit Aussenpolen so gering, dass dieselbe auf die Lagerschalenlänge reduziert, kaum 0,05—0,1 mm beträgt. Es genügt also, die Lagerschalen an den betreffenden Stellen, um diesen Betrag auszuschaben.

Eine weitere amerikanische Konstruktion ist in Fig. 298 abgebildet, welche einen Motor der bekannten Ventilatorenfabrik Lundell darstellt. Bei diesem Motor ist die ursprüngliche, von Jonas Wenström herrührende eigentümliche Magnetordnung in Anwendung gebracht mit einer centralen Spule und gekreuzten Polen.

Das Gehäuse ist dementsprechend zweiteilig ausgeführt, mit der Schnittfläche senkrecht zur Axe.

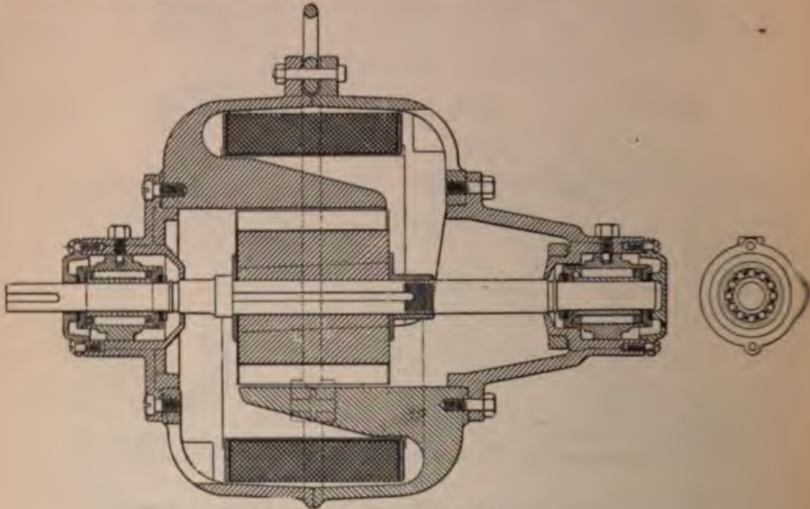


Fig. 298. Lundell-Motor.

Diese Magnetanordnung hat den Vorteil, der Maschine eine rundliche und abgeschlossene Form zu geben und ein spezielles Untergestell entbehrlich zu machen. Sie eignet sich jedoch weniger für grosse Maschinen als für kleinere Motoren, da die Herausnahme der Magnetspule bei event. Reparaturen stets einige Schwierigkeit bietet und einer kompletten Demontage der Maschine gleichkommt.

Eine Ausnahme hiervon bildet die früher erwähnte Schwungradmaschine Fig. 273 mit fliegender Armatur. Hier genügt es, den zweiteiligen Magnetkranz soweit zu verschieben, dass die Spule beim Kommutator vorbeikommt.

Es mag auch bemerkt werden, dass bei Anwendung einer centralen Spule der äussere Durchmesser im Verhältnis zur Länge ziemlich gross wird, was in einzelnen Fällen, je nach der Anwendung, welche vom Motor gemacht wird, unbequem ist.

Um daher den Durchmesser zu verringern, wendet Storey zwei axial verschobene Magnetfelder der beschriebenen Art an, mit verlängerter Armatur. Augenscheinlich wird dadurch etwas am Eisengewicht gewonnen, dagegen ist ca. 50 °/₀ mehr Kupfer notwendig.

X. Gewichte und Kosten von Dynamos.

A. Gewichte.

Eine Vergleichung verschiedener Fabrikate ist nur möglich, wenn die Maschinen gleiche Tourenzahl besitzen. Da nun die Leistung innert nicht allzugrosser Grenzen proportional der Tourenzahl ist, so sind in Nachstehendem sämtliche Angaben auf 1000 Touren (spez. Leistung) bezogen.

Die angehängte Tafel III enthält eine Anzahl Gewichtsangaben verschiedener moderner Fabrikate. Es ist einleuchtend, dass der Hufeisentype verhältnismässig schwerer wird, als die übrigen Modelle, dagegen fällt das überaus grosse Gewicht der Maschine von Lahmeyer auf, das keineswegs durch die Form begründet ist, denn wir sehen anderseits, dass die elektrischen Krahnmotoren von Oerlikon nicht einmal halb so schwer sind. Allerdings ist hier beizufügen, dass letztere Motoren aus Stahlguss hergestellt und nur für kürzere Betriebsdauer berechnet sind, dagegen weisen auch die 2poligen Motoren von Schuckert ein bedeutend geringeres Gewicht auf. Eine Erklärung wird wahrscheinlich in der Temperaturverschiedenheit dieser Maschinen zu suchen sein, über deren maximale zulässige Grenze allerdings noch abweichende Ansichten herrschen (s. S. 65, die Temperatur des Maschinenhauses ist zu 25° angenommen); ferner scheinen diese Maschinen mit geringer Drahtzahl und grosser Linienzahl zu arbeiten, es liegt darin eine gewisse Garantie für funkenlosen Gang.

Die Gewichtsfrage ist übrigens von ebenso grosser Bedeutung für den Käufer, als für den Fabrikanten, weil davon

1. der Reingewinn abhängt, und
2. schwere Maschinen oft einen niedern magnetischen Sättigungsgrad verraten, dessen Übelstände zu verschiedenen Malen erörtert wurden.

Man wird deshalb stets darnach trachten, das Gewicht thunlichst zu vermindern.

Die Kurven zeigen deutlich die Vorteile der mehrpoligen Maschinen gegenüber 2poligen.

Einzelne Fabrikanten bauen deshalb überhaupt nur mehrpolige Maschinen und zwar schon von 1 *KW* (spez. Leistung) an. Im allgemeinen jedoch sind die Grenzen für 4, 6 und 8 polige Maschinen wie folgt:

4 polige von 6—20 Kilowatt (spez. Leistung) an;
6 „ „ 100—150 „ „ „ „
8 „ „ 200—300 „ „ „ „

Bei der Berechnung von Projekten oder ganzer Serien gleicher Maschinen darf angenommen werden, dass das Gewicht eines bestimmten Types mit der spezifischen Leistung in der Potenz $^3/_4$ zunimmt, d. h.

$$\text{Gewicht} = c \, . \, W_s^{3/4} \, . \, \text{kg} \quad \text{(vergl. Formel 37).}$$

c variiert zwischen 160—200 für Maschinen mit 2 Lagern,
W_s Leistung bei 1000 Touren.

Für ein drittes Lager sind noch ca. 15 % hinzuzurechnen.

Nachstehend einige approximative Angaben über Gewichte von **Lagern** nach der in Fig. 271 gegebenen Konstruktion. In diesen Gewichten ist nur der obere Teil bis und mit dem Boden des Ölbehälters enthalten; das Gewicht des Ständers dagegen variiert zu sehr mit der Lagerhöhe und muss separat berechnet werden.

Wellendurchmesser in cm	3	5	10	15	20	25	30	35	40
Lagerschalenlänge in cm	10	16,5	33	42	50	58	62	72	80
Gewicht in kg	35	60	100	200	400	660	1100	1500	2200

Das **Gewicht der Armatur** beträgt zwischen 12—32 % vom Totalgewicht. Bei mehrpoligen Maschinen ist dasselbe grösser als bei 2 poligen.

Für eine approximative Bestimmung und unter Voraussetzung, dass die Zahl der Pole, wie oben angegeben, mit der Leistung zunimmt, gilt ungefähr nachstehende Tabelle:

Totalgewicht kg	Gewicht der Armatur
200	12 %
500	16
1000	19
2000	22
6000	25
10000	26
20000	28
50000	30
100000	32

Das relative Gewicht des Kommutators ändert sich zu sehr mit der Stromstärke, als dass sich hierfür eine allgemeine Regel aufstellen liesse. Ganz approximativ kann angenommen werden, dass dasselbe bei Maschinen von 100—125 Volt ca. 17 % des Armaturgewichtes betrage.

Armatursterne:

(163) $$\text{Gewicht} = c \, . \, W_s^{2/3} \, . \, \text{kg},$$

wobei c wie folgt einzusetzen ist:

Für Armatursterne ohne Arme (Hülsen)	3—4,
„ „ mit dünnen Speichen ohne Versteifung	8—10,
„ „ „ versteiften Speichen	12—14,
„ Ringarmaturen mit gusseiserner Nabe und Speichen und spez. Bronzekranz	15—20.

Im letzteren Falle entfällt auf den Bronzekranz ungefähr die Hälfte des Gewichtes.

Eisenscheiben:

$$\text{Gewicht in kg} = \frac{D^2 \pi}{4000} l \gamma (1 - \tau^2) \, 7{,}5$$
$$= \text{rund } 0{,}006 \, D^2 l \gamma (1 - \tau^2).$$

γ = Querschnittsverminderung durch die Papiereinlage, sowie die Zacken etc.
= 0,85—0,9 für glatte Armaturen,
= 0,75—0,85 für Zackenarmaturen,

$\tau = \frac{\text{innerer Armaturdurchmesser}}{\text{äusseren Durchmesser}}$ (S. 77).

Kupfer:

Nach Gleichung (33) ist

$$\text{Gewicht in kg} = 0{,}45 \frac{W}{i^2} \cdot$$

W = Wattverlust in Kupfer,
i = approx. 90 s Ampère pro mm² (S. 74).

Gewichte von **Riemenscheiben.**

Die nachstehende empirische Formel ist aus einer grösseren Zahl von Riemenscheiben von 0,1—3 m Durchmesser mit Ausbohrungen bis zu 23 cm abgeleitet.

(164) $$\text{Gewicht in kg} = c \, . \, \mathfrak{b} \, . \, \mathfrak{D}^2.$$

$\mathfrak{b}$ = Breite in cm,
$\mathfrak{D}$ = Durchmesser in cm.

$\mathfrak{T}$ in cm	c	$\mathfrak{T}$ in cm	c
10	0,00130	70	0.00080
15	0,00100	100	0,00076
25	0,00095	150	0,00073
50	0,00085	225	0,00070

Die obige Formel giebt sehr gute mittlere Resultate, die grössten Abweichungen betragen kaum 15 % über oder unter dem berechneten Gewicht.

Eine Riemenscheibe von 100 cm Durchmesser und 50 cm Breite hat beispielsweise ein

$$\text{Gewicht} = 0{,}00076 \cdot 50 \cdot 100^2 = 380 \text{ kg}.$$

Gewicht des **Magnetkranzes.**

Das Gewicht des eigentlichen Magnetkranzes ohne Gestell und Lager lässt sich mit etwelcher Annäherung aus der Kraftlinienlänge L und den Querschnitten S wie folgt bestimmen:

(165) $$\text{Gewicht in kg} = (L_m \cdot S_m + L_m' \cdot S_m' + L_m'' \cdot S_m'' + \ldots)\frac{7{,}2}{1000}.$$

Für Stahlgussmagnete ist 7,2 durch 7,8—7,9 zu ersetzen.

B. Dimensionen.

Die nachstehenden Tabellen beziehen sich nicht auf ein spezielles Fabrikat, sondern sind als Mittelwerte einer grösseren Zahl von Maschinen zu betrachten. Sie mögen deshalb bei Projektzeichnungen ganz gute Dienste leisten.

W_s = spez. Leistung in KW.

Aufrechtstehender Hufeisentype.

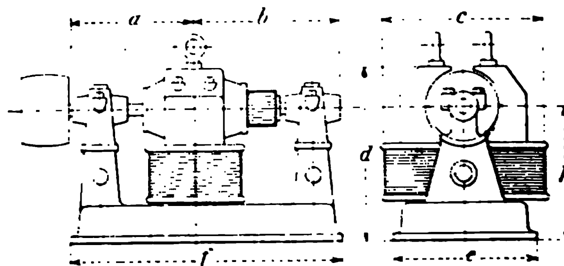


Fig. 299.

W.	1	2	4	8	12	20	30	50	75	100	150
a	220	270	330	400	440	490	540	625	710	785	910
b	380	460	530	600	650	720	785	890	985	1060	1160
c	310	380	440	520	570	660	740	860	960	1050	1130
d	310	420	500	590	650	750	850	980	1100	1200	1300
e	280	340	400	470	520	600	680	790	885	960	1050
f	630	720	850	980	1060	1190	1300	1480	1650	1790	2000
h	280	340	400	470	520	600	680	790	885	960	1050

Manchester-Dynamo.

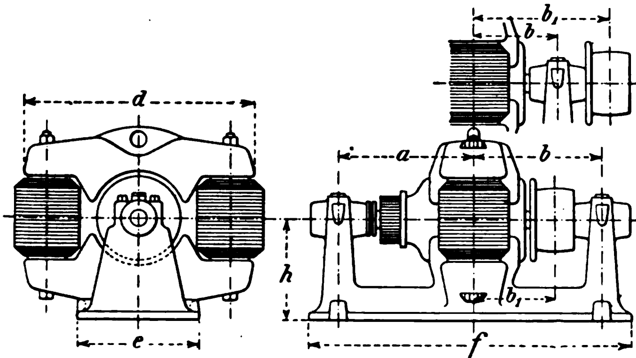


Fig. 300.

W.	1	2	4	8	12	20	30	50	75	100	150
a	230	290	340	410	470	550	620	700	735	750	780
b	230	290	340	410	470	550	620	— (700)[1]	— (735)	—	—
b_1	150	180	225	280	320	380	430	720 (500)	790 (550)	840	910
d	500	600	680	770	820	950	1050	1200	1360	1485	1670
e	180	210	250	310	350	410	465	555	650	730	850
f	550	720	870	1060	1180	1340	1480	1290 (1690)	1460 (1860)	1580	1800
h	150	180	225	280	320	380	430	500	550	580	630
								Pulley fliegend			

[1]) Die eingeklammerten Zahlen gelten für den Fall, wo die Riemenscheibe zwischen 2 Lagern liegt.

Aufrechtstehender 2poliger Type.

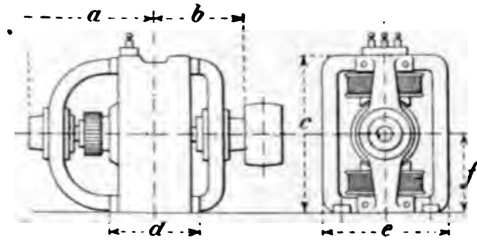


Fig. 301.

W.	0,4	0,7	1	1,5	3	5	8	12	15	1
a	260	290	310	335	390	445	510	585	635	6
b	176	200	210	230	276	320	365	415	450	4
c	395	420	445	475	535	576	640	690	720	7
d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
e	245	275	290	320	380	430	495	550	575	6

f $f = \frac{c}{2}$ + kleiner Zuschlag.

Vielpolige Dynamo (4polig).

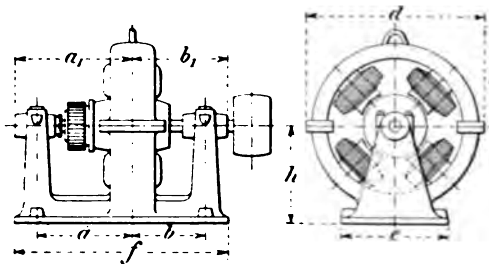


Fig. 302.

W.	10	20	30	50	75	100	130	160	200
a	460	470	490	530	580	610	700	730	790
a_1	575	600	620	670	725	780	860	930	970
b	314	330	340	370	400	430	470	490	510
b_1	450	470	485	515	555	600	650	675	700
c	570	600	630	670	720	780	860	930	970
d	830	865	900	975	1065	1150	1210	1260	1340
e	505	530	550	595	650	700	790	870	970
f	1020	1070	1120	1225	1350	1480	1510	1540	1590

Vielpolige Dynamo (Type à 6, 8 und mehr Pole).

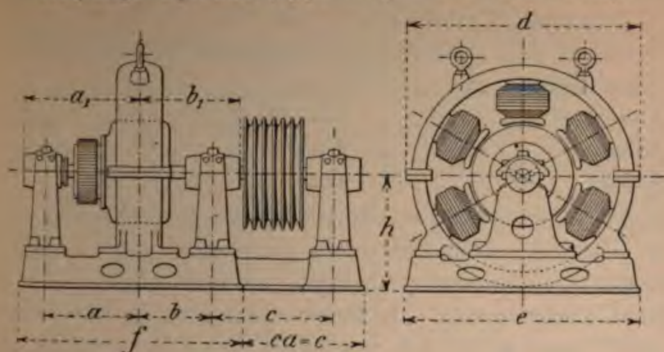


Fig. 303.

W.	300	500	750	1000	1500	2000	2700
a	830	860	900	970	1000	1040	1100
a_1	1030	1090	1125	1170	1220	1270	1330
b	510	560	615	665	710	750	790
b_1	740	780	845	900	950	1000	1050
c	1000	1100	1150	1200	1300	1400	1500
d	1500	1850	2250	2600	3100	3400	3600
e	1300	1600	2000	2400	2900	3200	3400
f	1700	1890	2120	2300	2580	2770	2960
h	1540	1700	2000	2140	2400	2600	2800

C. Kalkulation.

Die nachstehenden Angaben über Selbstkosten sind natürlich nur innert weiterer Grenzen zuverlässig und unterliegen je nach der örtlichen Lage und den Lohnverhältnissen mehr oder weniger grossen Modifikationen. Zu bemerken ist auch, dass bei der Quotierung der Arbeitslöhne eine Fabrikation von mehreren gleichartigen Maschinen auf einmal vorausgesetzt wurde. Handelt es sich nur um eine Maschine, so ist ein entsprechender Zuschlag zu machen. Ferner sind die Modelle nicht inbegriffen.

Die Selbstkosten setzen sich wie folgt zusammen:

1. Preis des Rohmateriales nebst Zuschlag für Lagerung, Abgang und Transport,
2. reine Arbeitslöhne,
3. allgemeine Unkosten, welche gewöhnlich in Prozenten der Arbeitslöhne veranschlagt werden.

Ganz allgemein verteilen sich die Gewichte der Materialien ungefähr in folgendem Verhältnis:

Gusseisen oder Stahlguss 70—80 % des Totalgewichtes,
Schmiedeisen . . . . 3—5 % „ „
Eisenscheiben . . . . 8—12 % „ „
Bronze . . . . 2—5 % „ „
Kupfer . . . . 8—11 % „ „

Für die Materialpreise sei auf die nachstehende Tabelle verwiesen.

Der Zuschlag betrifft den durch die Bearbeitung verloren gehenden Prozentsatz, der sozusagen als wertlos zu betrachten ist, den Kupferdraht nicht ausgenommen. Letzterer muss etwa 2—3 % länger als nötig bestellt werden und hat gewöhnlich keine Verwendung mehr.

Mittlere Materialpreise von Dynamomaschinen.

Material	Spez. Gewicht	Zuschlag auf das bearbeit. Gewicht	Rohpreis pro kg in Franken
1. **Eisen:**		%	
Gewöhnlicher Grauguss .	7,2	5—7	—. 25 bis —.35.
Stahlguss.	7,8—7,9	6—8	bis 50 kg —.75 bis 1.—. „ 100 „ —.65 „ —.75. über 100 „ —.50 „ —.65.
Schmiedeisen, ungeschmied.	7,6—7,8	6	—. 20 bis —.40.
Wellenstahl.	„	6	—. 40 „ —.50.
Induktorblech; maximale Dimension 1,2 × 1,2 m .	„	15	—. 35 „ —.50.
Eisenband für Flachringe.	„	5	—. 70 „ —.80.
2. **Bronze**	8,3—8,8	10	2.— bis 3. —.
3. **Zink,** in Platten . . .	7	—	—. 75.
4. **Kupfer:**			sehr variabel.
Als Draht oder Barren gezogen	8,8—9	2—3	1. 60 bis 1. 80.
Als Kabel	„	„	8—10 % mehr als Draht gleichen Gewichtes. Gewicht ca. 5 % grösser als dasjenige von massivem Draht gleichen Querschnittes.
Als Platten	„	—	2. 70.
Für Kommutatorlamellen .	9—9,2	—	3. —.
Kosten der Umspinnung u. Umklöppelung	—	—	1 × umsponnen —.20 bis —.30. 2 × „ —.30 „ —.50. 3 × „ —.60 „ —.90. 1 × umklöppelt —.50 „ —.90.
5. **Micca:**			
In Blocs von ca. 3 × 20 cm	2,8	10—20	16. — bis 25. — je nach Qualität
Grosse Platten 10 × 40 cm		10—20	bis 50. — je nach Qualität
Miccatuch, 0,4 — 0,6 mm Dicke	—	—	15. — bis 20. —.

Material	Spez. Gewicht	Zuschlag auf das bearbeit. Gewicht	Rohpreis pro kg in Franken
6. **Ebonit:**			
Façonstücke	1,3	—	bis 15. — (hängt sehr von der Qualität ab und kann bis zu Fr. 20. — I. Qual. kosten.)
Platten	„	—	9. — bis 15. —
Röhren, unpoliert. . . .	„	—	7. —
7. **Asbest:**			
In Platten	2.1—2,8	—	
In Spulen	„	—	
Vulcabeston:			
In Platten	—	—	8. —.
In Ringen	—	—	8. — bis 10. —.
8. **Fiber,** in Platten . . .	2,1—2,8	—	5. —.
9. **Papier:**			
Blechscheiben-Isolation .	—	—	—. 40 bis —. 70.
Pressspahn	1.28	—	1. 20 „ 1. 50.
Spulen und geformte Stücke aus gepresstem Karton .	—	—	7. — „ 12. —, Zuschlag für Modell 10. — bis 20. —.

Für Magazinierung, Verzinsung und Abgang mögen je nach Umständen 15—20 % Zuschlag auf den Materialpreis hinreichen.

Die gesamten Arbeitskosten lassen sich in gewissem Masse nach dem Gewichte schätzen und betragen, mittlere Löhne und Massenfabrikation zu Grunde gelegt:

kg	250	500	1000	2000	4000	6000	10000
Cts. per kg	45	40	35	25	17	14	12

Eine Detaillierung hat keinen Zweck, weil die Kosten der verschiedenen Arbeiten bei ungefähr gleichem Gesamtpreis ziemlich stark schwanken. Interressieren können höchstens die Kosten der Wicklerei, welche ca. 20—30 % ausmachen.

Die allgemeinen Unkosten hängen vollständig von der Werkstätteneinrichtung und der Grösse des jährlichen Marktes ab; je besser die Werkstätten ausgestattet sind, desto grösser fallen auch die allgemeinen Unkosten aus. Umgekehrt jedoch sind die Arbeitskosten wieder entsprechend kleiner. Wo also in dem einen Falle ein Zuschlag von 100 % auf die Arbeitskosten genügt, haben moderne Fabriken mit 150—180 % zu rechnen.

XI. Übersichtliche Zusammenstellung

der

zur Berechnung notwendigen Formeln.

Die Schwierigkeit beim Entwurfe einer neuen Maschine bes nicht in der eigentlichen Rechnung, sondern in der Art und W die vorhandenen Formeln in nutzbringender Weise anzuwenden. sonders der Anfänger hat in erster Zeit etwas Mühe, aus der gro Menge aller möglichen Formeln, von denen jede an und für sich w tig ist, gerade diejenigen herauszufinden, welche ihn schnell Ziele führen.

Um daher den Überblick zu erleichtern, ist im Nachsteher eine kurze schematische Zusammenstellung der wichtigsten bisher geführten Gleichungen gegeben, in der Reihenfolge, wie dieselben gefähr zur Anwendung gelangen dürften.

Es handle sich darum, eine ganz neue Maschine aufzuzeichı

Gegeben sei

die Klemmenspannung E,
die Stromstärke J,
die Tourenzahl n und
der ungefähre Nutzeffekt ζ.

Ferner sei man sich über die Art der Wicklung, Serie, Sh u. s. w. bereits im Klaren.

Gesucht die übrigen Grössen.

Handelt es sich um einen Generator, so kann, insofern über Polzahl nichts vorgeschrieben ist, ungefähr folgende Regel benutzt wer

4 polige	Maschinen	beginnen	bei	ca.	6—20	KW	spez. Leistun
6 „	„	„	„	„	100—150	„	„ „
8 „	„	„	„	„	200—300	„	„ „

Den aus dem Nutzeffekt berechneten Verlust zerlege man in die einzelnen Glieder:

$$w_a, \; w_h, \; w_r, \; w_m \text{ u. s. w.}$$

w_m darf nicht zu klein sein, weil die Maschine sonst sehr empfindlich für Strom- und Tourenänderungen wird.

Die Rechnung zerfällt nun in

A. Berechnung der Armatur;
B. „ „ Magnete.

Für die Wahl der Maschinenform siehe Tafel II.

Anmerkung. Die Zahlen in Klammern bedeuten stets die Seitenzahlen.

A. ARMATUR.

D = Durchmesser in cm,
l = Länge in cm,
$\lambda = \frac{l}{D}$,
$2p$ = Anzahl Pole,
$2p_1$ = Anzahl parallele Stromzweige,
Φ = Linienzahl pro Pol,
N = Anzahl Drähte.

1. Erste approximative Vorausbestimmung der äusseren Dimensionen. (72)

Für Ringarmaturen:

49 u. 51. $$D = 39 \sqrt{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{l}} = 11,5 \sqrt[3]{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}}$$

Für Trommelarmaturen: (73)

50 u. 52. $$D = 32 \sqrt{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{l}} = 10 \sqrt[3]{\frac{EJ}{n} \cdot \frac{1}{\lambda}}$$

Diese Formeln beziehen sich auf Generatoren und stimmen für Maschinen von ca. 15—400 *KW* und 100—150 Volt ziemlich gut; für kleinere ist etwas mehr, für grössere etwas weniger zu nehmen. Bei Motoren setze man $EJ = 736 \; PS$.

Vergleiche auch die Tabelle ausgeführter Armaturen (80 u. 81).

Kontrolle (74). Die Umfangsgeschwindigkeit darf nicht über 20—25 m betragen. Aufzeichnen eines Teiles des Armaturumfanges (Fig. 62), wobei der Drahtquerschnitt provisorisch wie folgt angenommen wird:

55. $$s = \frac{J}{p_1 \cdot 180 \, \varepsilon} \text{ mm}^2$$

$100\,\varepsilon$ = % Ohm'scher Spannungsverlust (ε = 0,02—0,06).

Dicke der Isolation (70).

Mit Bezug auf Fig. 62 sei

N' = Anzahl Windungen pro Länge u_1,

so ist die totale Zahl Drähte

$$N = \frac{D\pi}{u_1} \cdot N'$$

und es muss

26. $$N < 6{,}37 \frac{B_l \delta p_1 . p}{J . \beta}$$ (

sein.

B_l = Kraftliniendichte in der Luft,
δ = Luftabstand in cm, β (siehe Fig. 153).

Zu diesem Zwecke müssen die Polschuhe ebenfalls aufgezeich werden.

B_l ergiebt sich aus Gleichung (10).

$$B_l = \frac{E . 60 . 10^8 p_1}{n N . p} \cdot \frac{1}{b . l} \cdot$$

b = Polbogen in cm = $\frac{D\pi}{2p} \cdot \beta$,

$E = EMK = (1 \pm s') E_1$.

s' = Spannungsabfall = rund 3—4 s, mit Berücksichtigung der Armaturreak

Bevor man die Armatur genauer bestimmt, empfiehlt es : schnell die Magnetwicklung oberflächlich nachzurechnen. Es ist hi nicht notwendig, die Magnete sorgfältig aufzuzeichnen, auch kann ganz approximativ die aw für das Eisen gleich denjenigen für Luft ansetzen.

2. Zweite Annäherungsrechnung.

56. $$D = \sqrt{\frac{E p_1 . u_1 \, 12 . 10^8}{n N' \beta B_l l}} \cdot$$

Kontrolle. Bestimmung der genauen Wicklungslänge $\mathfrak{L}$.

28. **Drahtquerschnitt** $s = \frac{\mathfrak{L} . N J}{200 . \varepsilon \, E . p_1^2} \cdot$

Nachsehen, ob die Wicklung Platz hat.
Wicklungsregeln (23 und 28).
Vergleiche über Trommel- und Ringwicklungen (38).

Da die maximale Zahl Kommutator-Lamellen $N_2 = \frac{N}{2}$ bei Trom leich N bei Ringen ist, untersuche man auch, speziell bei E

spannungs-Maschinen, ob die grösste zulässige Spannung zwischen zwei Segmenten (291):

$$e_2 = \frac{E\,2p}{N_2}$$

nicht grösser als 30—40 Volt wird, eventuell ist die Wicklung oder die Polzahl zu ändern.

Sättigung in den Zacken von Zackenarmaturen darf nicht über 16000—17000 im Maximum betragen.

3. Bestimmung des inneren Armaturdurchmessers D_1.

Der innere Durchmesser ergiebt sich aus Φ und B_a, resp. dem Hysteresisverlust, den man zulassen will.

10. $$\Phi = \frac{E.60.10^8 p_1}{n.N.p}.$$

$$B_a = \frac{\Phi}{S_a}.$$

Annäherungsweise ist

B_a = 14000—16000 bei 2poligen Maschinen, (77)
12000—14000 „ 4 „ „
9000—12000 „ 6 „ „

Anderseits zeigen ausgeführte Maschinen ungefähr folgende Verhältnisse von $\tau_1 = \frac{D_1}{D}$. (78)

Zahl der Pole	τ_1
2	0,3 —0,4
4	0,6 —0,65
6	0,65—0,70
8	0,75—0,80
10	0,78—0,83
12	0,80—0,85
24	0,9

Kontrollrechnung.

34. **Wattverlust durch Hysteresis** $w_h = \eta . B_a^{1.6} . \omega . V . 10^{-7}$. (55)

$$\omega = \frac{p\,n}{60},$$

V = Eisenvolumen in cm^3.

Der nach Gleichung (34) ermittelte Hysteresisverlust fällt in Wirklichkeit immer zu klein aus. Viel genauere Resultate erhält man mit den nachstehenden Formeln,[1]) welche in Kap. II, weil schon abgesetzt, nicht mehr aufgenommen werden konnten.

Es sei

$B_l = \frac{\Phi}{S_l}$ die Kraftliniendichte in der Luft durch die Magnetinduktion,

$B_l' = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{JN}{4 p p_1} \cdot \frac{\beta}{2\delta}$ die Kraftliniendichte in der Luft, erzeugt durch Armaturreaktion,

$B_a = \frac{\Phi}{S_a}$ die Liniendichte im Armatureisen, ausschliesslich infolge der Magnetinduktion,

$B_z = \frac{\Phi}{S_z}$ die Liniendichte in den Zacken,

$B_z' = B_l' \cdot \frac{S_l}{S_z}$ die Liniendichte in den Zacken infolge Armaturreaktion,

V_a, V_z der Eiseninhalt des Armaturkernes und der Zacken.

Der Hysteresisverlust ist dann

bei Zackenarmaturen

$$w_h = \frac{\omega V_a}{10^7}\left[\eta B_a^{1,6} A + \eta \left(B_l + B_l'\right)^{1,6} \cdot 0,85\right] + \frac{\omega V_z}{10^7} \cdot \eta \left(B_z + B_z'\right)^{1,6},$$

bei glatten Armaturen

$$w_h = \frac{\omega V_a}{10^7}\left[\eta B_a^{1,6} A + \eta \left(B_l + B_l'\right)^{1,6} \cdot 0,85\right].$$

Die Koeffizienten A sind wie folgt anzunehmen:

$\frac{B_l'}{B_l}$ =	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A =	1	1,04	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,36	1,43	1,48	1,54

Verlust durch Wirbelströme.

Der Verlust im Eisenkern ist angenähert

$$w_f = 32\,(a \,.\, \omega \,.\, B_a)^2 \,.\, V_a \,.\, 10^{-12}.$$

a = Dicke der Eisenscheiben in cm.

Hierzu ist noch bei Zackenarmaturen der Verlust in den Zacken zu addieren, der im allgemeinen erheblich grösser ist:[2])

$$w_f' = \frac{4,35\,\xi\,D}{10^{12}\,p\,\delta}\,a^2\,\omega^2\left(B_z^{\,2} + B_z'^{\,2}\right) V_z + \frac{16,6}{10^{12}\beta}\,a^2\,\omega^2\,B_z'^{\,2}\,V_z.$$

[1]) Siehe Elektrotechn. Zeitschrift, 1. Juni 1899, Seite 393.
[2]) E.T.Z., 1. Juni 1899, S. 393.

Für ξ, β und δ siehe Fig. 153.

Verlust im Kupfer bei glatten Armaturen:

$$w_f'' = \frac{\xi D . d^2 \omega^2 (B_t^2 + B_t'^2)}{\delta . p . 10^{13}} V_k + \frac{0{,}375\, d^2 \omega^2 B_t'^2}{10^{12} . \beta} V_k .$$

d = Drahtdurchmesser in mm.

Für V_k ist nur der Kupferinhalt der Drähte, soweit dieselben induziert sind, einzusetzen, mit einem Zuschlag von ca. 5—10 % für die Stirnflächen der Armatur.

Bei Zackenarmaturen ist der so erhaltene Kupferverlust je nach der Grösse von δ mit einem Koeffizienten A_1 zu multiplizieren, welcher ungefähr folgende Werte hat:

δ = 0,3	0,5	0,7
A_1 = 0,06	0,09	0,12.

4. Berechnung der Erwärmung. (65)

43. $$\textbf{Erwärmung in C}^0 = \frac{225 \times \textbf{Wattverlust}}{\textbf{Oberfläche in cm}^2}.$$

Nach einer andern Formel ist

45. $$\textbf{Erwärmung der Armatur in C}^0 = \frac{645 \times \textbf{Wattverlust}}{\textbf{Oberfl.}\,(1 + 0{,}3 \sqrt{v})},$$

v = Umfangsgeschwindigkeit in m.

5. Dimensionen des Kommutators. (288)

Der Durchmesser soll so klein als möglich gehalten werden.

Für **Metallbürsten** ist

160) $$\textbf{Auflagfläche in mm}^2 \text{ pro Amp.} = \frac{4000}{E\left(\frac{400\, p_1}{J} + 1{,}2\right)}.$$

Bei Kohlenbürsten nehme man 12—15 mm² pro Amp. bei Hochannungsmaschinen, bei Maschinen niedriger Spannung 20—30 mm². erner vergewissere man sich an Hand der Gleichung (143), ob der annungsverlust nicht zu gross ausfällt.

$$\text{Spannungsverlust} = \frac{2\varrho}{s} \frac{J}{p_1}.$$

ϱ = ungef. 0,2 für Kohlenbürsten,
= „ 0,02 „ Metallbürsten.
s = Bürstenquerschnitt.

6. Funkenbildung und Bürsten-Verschiebung.

γ = Dicke einer Bürste an der Kontaktstelle gemessen,
γ_1 = Dicke einer Kommutatorlamelle,
r_3 = Widerstand einer Armaturspule,
r = Kontaktwiderstand,
k = Ampèrewindungen pro cm Armaturumfang,
K_1, K_2 u. s. w. (siehe Tabelle S. 215),
δ_1 (213), ξ (218), c (Fig. 153).

Man berechne

130. $$\frac{r_3 T}{L} = \vartheta_1 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_1} \cdot \frac{p_1}{p} \cdot \frac{\beta \varepsilon B_l}{\left(\frac{D K_1}{p \delta_1} + K_2 + \dots\right)}$$

$$\alpha = \frac{r_3}{r} = \frac{4 p_1^2 \varepsilon l_1 \gamma}{N_2 J \varrho} E$$

so muss

1. $$\frac{u}{c} = \frac{0{,}64 \delta p}{\xi \varepsilon D (1 - \beta) \beta} \cdot \vartheta_1 = > 0{,}53$$

sein, ferner

2. $$\frac{Q \gamma}{c \vartheta_1} > 0{,}6 \text{ und } < 2{,}6$$

3. $\frac{\vartheta_1}{\alpha}$ theoretisch > 1 sein oder möglichst wenig darunter

4. $\dfrac{\alpha + 2}{1 + \frac{\alpha}{\vartheta_1}}$ möglichst mehr als 1 sein.

7. Wellendurchmesser.

$\mathfrak{d}$ = Durchmesser an der gefährlichsten Stelle (zwischen Kollektor und Armatur) in cm,
n = Tourenzahl,
W = nützliche Leistung in KW.

Welle aus Schmiedeisen:

148. $$\mathfrak{d} = 20 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 23 \sqrt[3]{\frac{W}{n}} .$$

Welle aus Stahl:

149. $$\mathfrak{d} = 18 \sqrt[3]{\frac{PS}{n}} = 21 \sqrt[3]{\frac{W}{n}} .$$

Giebt für Maschinen über 100 *PS* etwas zu grosse, für kleine Maschinen bis ca. 15 *PS* zu kleine Wellendurchmesser.

Vergleiche die Tabelle ausgeführter Wellen (257).

Keiltabelle XII (402).

B. MAGNETE. (156)

Wir wollen annehmen, die Armatur sei nunmehr derart entworfen, dass sie in jeder Beziehung den aufgestellten Bedingungen entspreche; man habe sich auch durch eine kleine approximative Berechnung der Ampère-Windungen der Magnete überzeugt, dass die Maschine richtig proportioniert sei; diese Kontrollrechnung sollte, beiläufig bemerkt, niemals unterlassen werden — es verbleibt folglich nur noch die definitive Feststellung der Magnetdimensionen und Bewicklung.

Man zeichne zunächst die Magnete ganz roh auf, unter Reservierung eines mutmasslichen Wicklungsraumes. Da ausgeführte Maschinen ca. 2—4 mal, im Mittel $2\,^1/_2$ mal soviel Ampère-Windungen pro magnetischen Stromkreis als auf der Armatur besitzen, mag für eine erste approximative Berechnung

$$a\,w \text{ pro magnet. Stromkreis } \mathfrak{J}m = \frac{J\,N}{4\,p\,p_1} \cdot 2{,}5$$

angenommen werden.

Der approximative Wicklungsraum ist dann

(162) $$\textbf{Wicklungsraum in } \text{mm}^2 = c\,\frac{(\mathfrak{J}m)^2 . \mathfrak{L}}{50\,w} .$$

$\mathfrak{L}$ = mittlere Wicklungslänge in m,
w = Wattverlust pro Spule,
$\mathfrak{J}m$ = Ampère-Windungen pro Spule.

Je nachdem Rechteck- oder konische Wicklung (310) angewandt wird, ist für c folgender Wert einzusetzen:

Durchmesser des Drahtes in mm	0,5	1	2	3	4	5 u.mehr
Rechteckwicklung c =	5	2,9	2,15	1,86	1,68	1,57
Konische Wicklung c =	3,75	2,2	1,6	1,4	1,26	1,18

Sind auf diese Weise die voraussichtlichen Kraftlinienlängen annäherungsweise bestimmt, so kann an eine genauere Rechnung der $a\,w$ geschnitten werden und zwar nach folgendem Schema mit Benutzung der Gleichung (75) S. 144.

Bezeichnung	Querschnitt S in cm²	Streuungskoeffizient ν resp. K	Kraftliniendichte B pro cm²	Kraftlinienlänge L in cm	aw pro cm Länge $f(B)$	aw Total
Polstücke						
Bügel						
Armatur						
Luft						
					Total	

Für die Streuungskoeffizienten ν und K siehe Seite 143, 148 und 150; $f(B)$ kann aus Tafel I entnommen werden.

Zu dieser Tabelle ist zu bemerken:

1. Bei Serienmaschinen ist Φ aus der E.M.K., d. h. aus der Bürstenspannung + dem Spannungsabfall (bei Motoren —) auszurechnen, das Gleiche gilt für Nebenschlussmaschinen.
2. Bei Kompoundmaschinen sind zwei Rechnungen durchzuführen. der ersten legt man Φ, berechnet aus der Bürstenspannung (giebt die Nebenschlusswicklung), der zweiten Φ, berechnet aus der E.M.K., zu Grunde. Die Differenz aus den beiden giebt die aw der Kompoundwicklung.

Übrigens empfiehlt es sich. auch bei Nebenschlussmaschinen die beiden Rechnungen für Leerlauf und volle Belastung durchzuführen. um gleichzeitig die Grösse des Vorschaltwiderstandes zu bestimmen (187).

61. **Drahtquerschnitt** $s = \frac{(\mathfrak{Z}m)\, m_1 . \mathfrak{L}}{E . 50}$. (88)

m_1 = Anzahl hintereinander geschalteter Spulen.
E = Spannung an den Enden der Magnetwicklung. Für Seriemaschinen und Kompoundwicklungen = totaler Spannungsverlust (εE), für Nebenschlussmaschinen = Bürstenspannung.

Windungszahl pro Spule:

63. $m = \frac{\mathfrak{Z}m}{\varepsilon . J} = \frac{\mathfrak{Z}m}{\mathfrak{Z}}$. (89)

Kontrolle. Nachzusehen, ob die Wicklung in dem vorausgesetzten Wicklungsraume Platz findet und eventuell die ganze Rechnung noch einmal ausführen.

Erwärmung der Magnete.

44. **Erwärmung in C°** $= \frac{335 \times \textbf{Wattverlust pro Spule}}{\textbf{Oberfläche einer Spule in cm}}$. (66)

Anmerkung. Statt wie oben angenommen, den Spannungsabfall durch Armaturreaktion zum Ohm'schen Verlust zu schlagen und hieraus Φ auszurechnen, kann auch die auf Seite 229 angegebene Methode benutzt werden. Beide Methoden müssen richtig interpretiert selbstverständlich das gleiche oder angenähert das gleiche Resultat ergeben. Bei grösseren Abweichungen wird sich der Anfänger an die grössere Zahl halten.

C. ZUSAMMENSTELLUNG.

Hat man nun die Maschine in der angegebenen Weise durchgerechnet, so ist es notwendig, die gefundenen Zahlen in übersichtlicher Weise zusammenzustellen und zwar so, dass auch eine zweite Person jederzeit im stande ist, die Rechnung zu kontrollieren. Es mögen zu diesem Zwecke einige praktisch bewährte Winke von Nutzen sein:

Ist die Maschine definitiv bestimmt, so werden die elektrischen und Konstruktionsdaten, ungefähr wie das Musterformular am Schlusse (nach Seite 410) zeigt, auf ein loses Blatt eingetragen, das später in einen nach Typen geordneten Shannon eingereiht wird. Die Rückseite ist für die Versuchsdaten reserviert. Selbstredend hat es keinen Zweck, die Versuchsdaten bei gleichen Maschinen zu wiederholen. Dagegen sollte dies nicht unterbleiben, sofern Änderungen in den Dimensionen, in der Wicklung oder im Guss vorgenommen werden. Auch die Gewichte können bei späteren Ausführungen des nämlichen Typus wegfallen. Von den Versuchen sind zu notieren:

1. Die Leerlaufs-Charakteristik, bezogen auf Erregung und Spannung.
2. Einige Belastungskurven, d. h. Spannungskurven bei konstanter Erregung und variabler Armatur-Stromstärke, desgleichen bei konstanter Klemmenspannung und variabler Belastung.
3. Verlustkurve, Maschine als Motor angetrieben (S. 263).
4. Widerstandsmessung der Armatur und Magnete.
5. Isolationsmessung der Wicklungen gegen das Gestell.
6. Temperaturzunahme der Maschine nach mehrstündiger Dauerleistung; wenn immer möglich aus der Widerstandszunahme der Wicklungen berechnet.
7. Beobachtungen über eventuelle Funkenbildung, Bürstenverschiebung u. s. w.

bei 0° C. und

und Strecke

Bemerkungen

42 Ni. 1 Mn

Lazare, Weiller & Co.

55 Cu. 25 Ni. 19,5 Zn

II. Drahttabelle. (Die Widerstände gelten für eine Temperatur von 66° C.)

Durchmesser in mm	Querschnitt in mm²	Gewicht in kg pro 1000 m	Widerstand in Ohm pro 1000 m	Durchmesser in mm	Querschnitt in mm²	Gewicht in kg pro 1000 m	Widerstand in Ohm pro 1000 m
0,1	0,0079	0,0699	2542,75	5,5	23,7583	211,45	0,84056
0,2	0,0314	0,2796	635,28	5,6	24,6301	219,21	0,81081
0,3	0,0707	0,6291	282,52	5,7	25,5176	227,11	0,78261
0,4	0,1257	1,1184	158,925	5,8	26,4208	235,14	0,75610
0,5	0,1963	1,7475	101,708	5,9	27,3397	243,32	0,73045
0,6	0,2827	2,5164	70,660	6,0	28,2743	251,64	0,70631
0,7	0,3848	3,4251	51,892	6,1	29,2247	260,10	0,68258
0,8	0,5027	4,4736	39,730	6,2	30,1907	268,70	0,66147
0,9	0,6362	5,6619	31,391	6,3	31,1725	277,43	0,64063
1,0	0,7854	6,990	26,197	6,4	32,1699	286,31	0,62077
1,1	0,9503	8,458	21,048	6,5	33,1831	295,13	0,60180
1,2	1,1310	10,066	17,657	6,6	34,2120	304,49	0,58371
1,3	1,3273	11,813	15,045	6,7	35,2565	313,78	0,56642
1,4	1,5394	13,700	12,972	6,8	36,3168	323,22	0,54990
1,5	1,7671	15,728	11,3006	6,9	37,3930	332,80	0,53407
1,6	2,0106	17,895	9,9325	7,0	38,4845	342,51	0,51892
1,7	2,2698	20,201	8,8101	7,1	39,5928	352,37	0,50490
1,8	2,5447	22,648	7,8478	7,2	40,7150	362,36	0,49048
1,9	2,8353	25,234	7,0435	7,3	41,8539	372,50	0,47715
2,0	3,1416	27,960	6,3567	7,4	43,0085	382,78	0,46422
2,1	3,4636	30,826	5,7657	7,5	44,1786	393,19	0,45203
2,2	3,8013	33,832	5,2535	7,6	45,3646	403,74	0,44022
2,3	4,1548	36,977	4,8066	7,7	46,5663	414,44	0,42886
2,4	4,5239	40,263	4,4143	7,8	47,7836	425,27	0,41793
2,5	4,9087	43,688	4,0683	7,9	49,0167	436,25	0,40737
2,6	5,3093	47,253	3,7613	8,0	50,2655	447,36	0,39730
2,7	5,7256	50,957	3,4880	8,1	51,5300	458,62	0,38755
2,8	6,1575	54,802	3,2432	8,2	52,8102	470,01	0,37815
2,9	6,6052	58,786	3,0235	8,3	54,1061	481,54	0,36910
3,0	7,0686	62,910	2,8187	8,4	55,4177	493,22	0,36036
3,1	7,5477	67,174	2,6446	8,5	56,7450	505,03	0,35193
3,2	8,0425	71,578	2,4831	8,6	58,0881	516,98	0,34380
3,3	8,5530	76,122	2,3348	8,7	59,4468	529,08	0,33593
3,4	9,0792	80,805	2,1996	8,8	60,8212	541,31	0,32835
3,5	9,6211	85,628	2,0756	8,9	62,2114	553,68	0,32101
3,6	10,1788	90,591	1,9620	9,0	63,6173	566,19	0,31391
3,7	10,7521	95,694	1,8573	9,1	65,0388	578.85	0,30705
3,8	11,3412	100,94	1,7608	9,2	66,4761	591,64	0,30041
3,9	11,9459	106,32	1,6717	9,3	67,9291	604.57	0,29398
4,0	12,5664	111,84	1,5902	9,4	69,3978	617,64	0,28776
4,1	13,2025	117,50	1,5126	9,5	70,8822	630.85	0,28223
4,2	13,8544	123,30	1,4315	9,6	72,3823	644,20	0,27590
4,3	14,5220	129,24	1,3851	9,7	73,8981	657,69	0,27025
4,4	15,2053	135,33	1,3133	9,8	75,4297	671,32	0,26475
4,5	15,9043	141,55	1,2556	9,9	76,9769	685 09	0,25943
4,6	16,6190	147,91	1,14166	10,0	78,5398	699,00	0,25427
4,7	17,3494	154,41	1,15106	11,0	95,03	345,8	0,21048
4,8	18,0956	161,05	1,10361	12,0	113,10	1006,6	0,17657
4,9	18,8574	167,83	1,05902	13,0	132,73	1181,3	0,15045
5,0	19,6350	174,75	1,01708	14,0	153,94	1370,0	0,12972
5,1	20,4282	181,81	0,97758	15,0	176,71	1572,8	0.113006
5,2	21,2372	189,01	0,93818	16,0	201,06	1789,5	0,099325
	22 0618	196,35	0,90520	17,0	226,98	2020,1	0,088101
	9022	203,83	0,88187	18,0	254,47	2264,8	0,078478

III. Kabel-Tabelle (Lazare, Weiller & Co.).

Zahl der Drähte	Durchmesser jedes Drahtes mm	Durchmesser des Kabels mm	Äquivalenter Draht		Gewicht in kg per km	Widerstand per km bei 15,5 0 C.
			Durchmesser mm	Querschnitt mm		
3	0,508	1,07	0,86	0,585	6	29,07
3	0,609	1,29	1,06	0,893	8	20,10
3	0,711	1,50	1,24	1,216	11	14,83
7	0,508	1,54	1,35	1,423	13	12,43
7	0,609	1,83	1,62	2,075	19	8,63
7	0,711	2,13	1,90	2,849	25	6,337
7	0,762	2,28	2,03	3,242	29	5,525
7	0,838	2,51	2,23	3,923	35	4,561
7	0,914	2,74	2,43	4,65	42	3,835
7	1,02	3,04	2,71	5,77	52	3,108
7	1,22	3,66	3,25	8,30	74	2,158
7	1,42	4,27	3,78	11,28	100	1,585
7	1,63	4,88	4,34	14,73	132	1,213
7	1,83	5,49	4,87	18,66	166	0,959
7	2,03	6,10	5,41	22,98	205	0,778
19	0,914	4,57	4,03	12,74	113	1,404
19	1,02	5,08	4,47	15,72	140	1,137
19	1,22	6,10	5,35	22,66	201	0,7897
19	1,42	7,10	6,27	30,91	274	0,6704
19	1,63	8,12	7,16	40,25	358	0,4445
19	1,83	9,14	8,05	50,96	453	0,3512
19	2,03	10,1	8,94	62,77	559	0,2845
19	2,34	11,6	10,7	83,20	740	0,2151
19	2,64	13,2	11,6	106,30	945	0,1683
37	1,63	11,3	10,0	78,6	699	0,2274
37	1,83	12,8	11,2	99,6	885	0,1797
37	2,03	14,2	12,5	122,9	1093	0,1456
37	2,34	16,3	14,3	162,6	1445	0,1101
37	2,64	18,4	16,2	207,7	1847	0,0861
61	2,34	21,0	18,5	268,7	2389	0,0666
61	2,64	23,7	20,9	343,4	3052	0,0521

IV. Tabelle der Hysteresis-Koeffizienten η.

(Nach Chas. Prot. Steinmetz, s. S. 55).

Material	η
Sehr weicher Eisendraht (Ewing)	0,002
Sehr dünnes Eisenblech	0,003
Dickes Eisenblech	0,0033
Zweite Sorte Eisenblech	0,0042—0,0045
Geglühter Gussstahl	0,008
Werkzeugstahl	0,0094
Gussstahl von minderer Susceptibilität	0,0120
Gusseisen	0,0162
Gehärtneter Gussstahl	0,0250

V. Tabelle der Hysteresis-Koeffizienten η.

(Nach Versuchen von Hopkinson.)

Material	Zustand		η
Schmiedeisen	—	geglüht	0,00202
Weicher Bessemerstahl	0,045 % C	„	0,00262
„ Witworth-Stahl	0,09	„	0,00257
„ „	0,32	„	0,00598
„ „	0,80	„	0,00786
„ „	0,32	in Öl gehärtnet	0,00954
„ „	0,89	„ „ „	0,01844
Siliciumstahl	3,44 % Si	geschmiedet	0,00937
„	„	geglüht	0,00784
„	„	in Öl gehärtnet	0,01282
Manganstahl	4,73 % Mn	wie geschmiedet	0,05963
„	„	geglüht	0,04146
„	8,74	„	0,08184
„	4,73	in Öl gehärtnet	0,06706
Chromstahl	0,62 % Cr	wie geschmiedet	0,01179
„	1,2	„ „	0,01851
„	0,62	geglüht	0,00897
Grauguss	3,47 % C	0,17 % Mn	0,01826
Weisser Guss	2,04	0,39	0,01616
Spiegeleisen	4,5	8,0	—

VI. Tabelle der 1,6 Potenzen von B.

(Siehe S. 55.)

B	Werte von $\eta \,.\, B^{1,6}$ für			B	Werte von $\eta \,.\, B^{1,6}$ für		
	$\eta = 0{,}002$	$\eta = 0{,}003$	$\eta = 0{,}004$		$\eta = 0{,}002$	$\eta = 0{,}003$	$\eta = 0{,}004$
500	41,6	62,4	83,2	10500	5432	8148	10864
1000	126,2	189,3	252,4	11000	5850	8775	11700
1500	241,2	361,8	482,4	11500	6282	9423	12564
2000	382,6	573,9	765,2	12000	6726	10089	13452
2500	546,4	819,6	1092,8	12500	7178	10767	14356
3000	731,8	1097,7	1463,6	13000	7642	11463	15284
3500	936,8	1405,2	1873,6	13500	8120	12180	16240
4000	1160	1740	2320	14000	8606	12909	17212
4500	1400	2100	2800	14500	9160	13740	18320
5000	1657	2486	3314	15000	9614	14421	19228
5500	1932	2899	3864	15500	10124	15186	20248
6000	2222	3333	4444	16000	10658	15987	21316
6500	2522	3783	5044	16500	11196	16794	22392
7000	2840	4260	5680	17000	11740	17610	23480
7500	3166	4749	6332	17500	12296	18444	24592
8000	3516	5274	7032	18000	12868	19302	25736
8500	3872	5808	7744	18500	13444	20166	26888
9000	4244	6366	8488	19000	14034	21051	28068
9500	4626	6939	9252	19500	14624	21936	29248
10000	5022	7533	10044	20000	15226	22839	30452

(34) $$\text{Hysteresisverlust} = \eta \,.\, B^{1,6} \,.\, \omega \,.\, V \,.\, 10^{-7}.$$

Anmerkung. Genauere Formeln finden sich Seite 388.

VII. Tabelle der Werte von $\lambda^{0,6}$.

(Siehe Seite 77.)

λ	$\lambda^{0,6}$	λ	$\lambda^{0,6}$
0,1	0,251	0,6	0,736
0,2	0,381	0,7	0,807
0,3	0,486	0,8	0,875
0,4	0,577	0,9	0,938
0,5	0,659	1,0	1,000

VIII. Tabelle der Werte aus Gleichung $\frac{(1-\tau)^{0,6}}{(1+\tau)} = A$.

A	τ	A	τ
0	1	0,439	0,50
0,085	0,95	0,481	0,45
0,132	0,90	0,525	0,40
0,173	0,85	0,571	0,35
0,212	0,80	0,620	0,30
0,248	0,75	0,673	0,25
0,286	0,70	0,730	0,20
0,323	0,65	0,789	0,15
0,360	0,60	0,853	0,10
0,400	0,55	0,922	0,05

IX. Werte von $x = \frac{4,6\,\delta}{\xi} \log_{10}\left(1 + \frac{\xi c}{\delta}\right)$.

	c	δ in cm					
		0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	2,0
α = 180°	2,5	0,63	1,01	1,30	1,54	1,75	2,03
	5	0,76	1,26	1,67	2,02	2,34	2,77
	7,5	0,84	1,41	1,89	2,31	2,69	3,24
	10	0,89	1,52	2,05	2,52	2,95	3,58
	15	0,96	1,67	2,28	2,83	3,32	4,07
α = 150°	2,5	0,72	1,16	1,45	1,70	1,92	2,22
	5	0,87	1,47	1,88	2,27	2,60	3,08
	7,5	0,96	1,65	2,14	2,62	3,04	3,62
	10	1,03	1,78	2,34	2,87	3,34	4,04
	15	1,12	1,97	2,60	3,23	3,87	4,62
α = 120°	2,5	0,83	1,30	1,65	2,92	2,15	2,45
	5	1,03	1,67	2,19	2,60	2,98	3,50
	7,5	1,14	1,89	2,51	3,03	3,50	4,16
	10	1,22	2,05	2,75	3,34	3,87	4,65
	15	1,45	2,28	3,08	3,79	4,43	5,38
α = 90°	2,5	0,99	1,45	1,72	1,86	1,92	2,76
	5	1,26	2,02	2,61	3,09	3,50	4,06
	7,5	1,41	2,31	3,03	3,64	4,17	490,
	10	1,52	2,52	3,34	4,04	4,67	5,55
	15	1,68	2,83	3,78	4,62	5,38	6,5

Kilo-Watt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Kilo-Watt
0,1	2,0	1,75	—	1,9	—	1,50	1,50	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1
0,25	1,8	1,60	—	1,75	2,00	1,40	1,40	—	—	—	—	—	—	—	—	0,25
0,5	1,7	1,50	2,00	1,65	1,90	1,35	1,35	1,80	1,90	—	—	—	—	—	—	0,5
1	1,65	1,45	1,90	1,60	1,80	1,30	1,30	1,70	1,75	—	—	—	—	—	—	1
2,5	1,6	1,40	1,80	1,55	1,70	1,28	1,28	1,60	1,65	1,75	1,60	1,50	1,40	1,90	2,00	2,5
5	1,55	1,35	1,75	1,50	1,65	1,25	1,25	1,55	1,60	1,65	1,50	1,40	1,35	1,80	1,90	5
7,5	1,50	1,30	1,70	1,45	1,60	1,22	1,22	1,50	1,55	1,60	1,45	1,35	1,32	1,70	1,80	7,5
10	1,45	1,28	1,65	1,40	1,55	1,20	1,20	1,45	1,50	1,55	1,40	1,32	1,30	1,65	1,70	10
25	1,40	1,25	1,60	1,35	1,50	1,18	1,18	1,40	1,45	1,50	1,35	1,30	1,28	1.60	1,65	25
50	1,35	1,22	1,55	1,32	1,45	1,15	1,15	1,35	1,40	1,45	1,30	1.28	1,25	1,55	1,60	50
100	1,30	1,20	1,50	1,30	1,40	1,12	1,12	1,30	1,35	1,40	1,25	1,25	1,22	1,50	1,55	100
200	1,25	—	—	—	—	—	—	—	—	1,38	1,22	1,22	1.20	1,45	1,50	200
300	1,20	—	—	—	—	—	—	—	—	1,35	1,20	1,20	1,18	1,40	1,45	300
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,18	1,15	1,35	1,40	500
1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,16	1,12	1,30	1,35	1000
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,15	1,10	1,25	1,30	2000

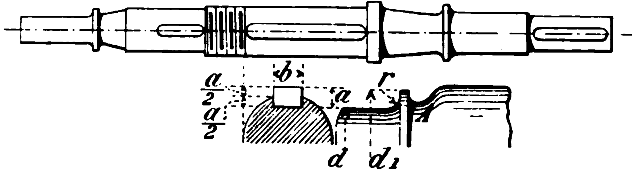
Anmerkung. Diese Zahlen sind für Zackenarmaturen etwa 5—10% zu gross.

XI. Tabelle der Werte von $\frac{a}{c}$, $\frac{u}{c}$, M und Q.

(Siehe Seite 219.)

$\frac{a}{c}$	$\frac{u}{c}$	M	Q
0,05	9,97	1,01	20
0,075	6,62	1,02	13,5
0,100	4,95	1,03	10,2
0,125	3,93	1,05	8,25
0,150	3,26	1,06	6,9
0,175	2,77	1,10	6,1
0,200	2,40	1,13	5,42
0,225	2,11	1,17	4,94
0,250	1,87	1,20	4,49
0,275	1,68	1,26	4,24
0,30	1,51	1,31	3,81
0,35	1,25	1,45	3,63
0,40	1,05	1,65	3,46
0,45	0,89	1,88	3,36
0,50	0,75	2,23	3,35
0,55	0,636	2,65	3,37
0,60	0,534	3,32	3,54
0,65	0,446	4,22	3,76
0,675	0,404	4,91	3,97
0,70	0,364	5,73	4,16
0,725	0,328	6,75	4,44
0,75	0,294	8,00	4,70
0,775	0,258	10,00	5,16
0,80	0,225	12,6	5,66
0,82	0,200	15,6	6,24
0,84	0,175	19,7	6,90
0,86	0,151	25,7	7,80
0,88	0,128	34,7	8,9
0,89	0,117	41	9,6
0,90	0,106	50	10,6
0,91	0,095	61,8	11,7
0,92	0,084	78	13,1
0,93	0,072	102,5	14,8
0,94	0,062	142	17,6
0,95	0,051	202	22,5
0,96	0,041	314	25,7
0,97	0,030	556	33,4

XII. Keiltabelle.



(Modifikationstabelle von Jul. Römmele, Freiburg i. B.)
Für gusseiserne und Bronce-Naben anwendbar; in letzterem Falle sind Doppelkeile vorzusehen.

Wellendurchmesser d in mm	Einfache Verkeilung		Doppelkeile	
	a	b	a	b
16— 20	5	7	4	6
21— 25	5	8	4	6
26— 30	6	10	5	7
31— 35	7	11	5	8
36— 40	7	12	6	10
41— 45	8	13	6	10
46— 50	9	15	7	11
51— 55	10	16	7	12
56— 60	10	17	8	13
61— 65	11	18	8	13
66— 70	12	20	9	15
71— 75	13	21	9	15
76— 80	13	22	10	17
81— 85	14	24	10	17
86— 90	14	25	11	18
91— 95	15	26	12	20
96—100	16	28	13	21
101—110	17	30	13	22
111—120	18	32	14	24
121—130	19	34	14	25
131—140	20	36	15	26
141—150	21	38	16	28
151—160	22	40	17	30
161—170	23	42	18	32
171—180	24	44	19	34
181—190	25	46	20	36
191—200	26	48	21	38
201—220	28	52	22	40
221—240	30	56	23	42
241—260	32	60	24	44
261—280	34	64	25	46
281—300	36	68	26	48

XIII. Berechnung der Riemenscheibenbreite.

(Siehe Seite 272.)

$$\mathfrak{b} = c \cdot \frac{PS}{v}$$

PS = Pferdestärken

v = Riemengeschwindigkeit in m per Sekunde.

$\frac{PS}{v}$	0,15	0,25	0,5	0,75	1	1,5	3	6	10	16,7[1]	29[1]	35[2]
c	48	39	24	20	17	15	10	7	6,5	6	4,9	3,7

[1]) Tramway-Generatoren der Westinghouse Co.
[2]) Dampfmaschine J. Farcot.

Alphabetisches Sachregister.

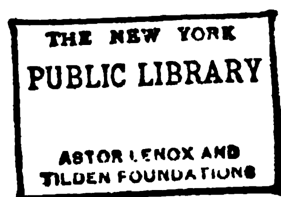
Druckfehler-Berichtigung.

Seite 13, Zeile 7 lies: *Dyn* statt *Ergs*.
„ 48, Fig. 50 verkehrt.
„ 67, In Gleichung 10 lies: p_1 statt p^1.
„ 67, Zeile 10 lies: Abschnitt **D** statt **C**.
„ 72, Zeile 10 lies: Abschnitt **E** statt **D**.
„ 74, Zeile 3 von unten lies: Gleichung (26) statt (24).
„ 96, Zeile 2 von unten lies: *4000* statt *4400*.
„ 199, Gleichung (99) lies: $r = \frac{\varrho}{l_1 \gamma}$ statt $r = \frac{\varrho}{J_1 \gamma}$.
„ 200, Zeile 6 von unten lies:
$$\left(\frac{1}{1-x} - \frac{1}{x}\right) dx = \varphi(x)\, dx \text{ statt } \left(\frac{1}{1-x}\right) dx =$$
„ 207, Gleichung (120) lies: $r_3 = \frac{4 p_1^2 \varepsilon}{N_2 . J} \cdot E$ statt $r_3 = \frac{4}{\Lambda}$
„ 216, Zeile 14 lies: $\frac{x_1}{x_2}$ statt $\frac{x_1}{y_2}$.
„ 224, Maschine Nr. 9 lies: *100* Volt statt *1100* Volt.
„ „ 10 „ *1800* „ „ *800* „
„ „ 14, zweitletzte Kolonne lies: *0,76*
„ „ 16, „ „ „ *1,04*
„ 226, Zeile 5 lies: } $\frac{Q \gamma}{c \vartheta_1}$ statt $\frac{Q \cdot \gamma}{c \vartheta}$.
„ 228, „ 10 „ }
„ 226, „ 15 lies: } $\frac{c}{\delta}$ statt $\frac{c}{\vartheta}$.
„ 227, „ 7 v. unten lies: }

Zahl d
"
"
Art d
Dimen
Durch
Länge
Durch
Länge

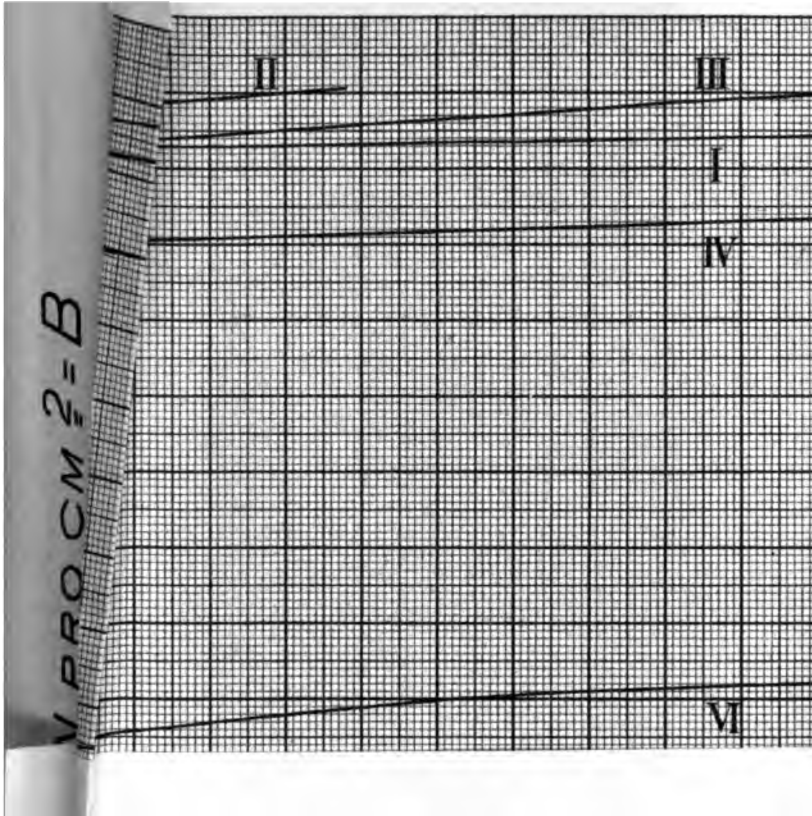
W
W:
W
W.

Za


THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS

4te AUFLAGE 1899

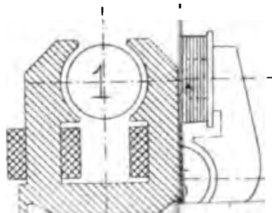
ELECTR. ?OMMASCHINEN

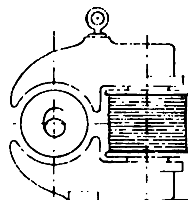


TAFEL II

M-MASCHINEN

e 1899

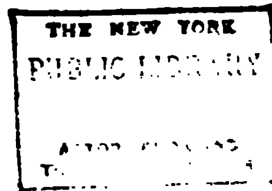




truction, **ELECTR.**

000 000 000 000




THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY





